

**Berichte des Forschungsschwerpunkts
Ambient Intelligence**

Nr. 4

**Untersuchungen zur Energiegewinnung für
AmI-Systeme**

**Philipp Münch
Oliver Gabel**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Möglichkeiten zur elektrischen Energiegewinnung	3
2.1	Energiequellen am menschlichen Körper	3
2.1.1	Mechanische Energie	3
2.1.2	Thermische Energie	5
2.2	Umwandlung in elektrische Energie	6
2.2.1	Energieumwandlung nach dem Generatorprinzip	6
2.2.2	Solarenergie	7
2.2.3	Piezoelektrische Energiewandlung	9
2.2.4	Thermoelektrische Effekte	11
3	Speichern elektrischer Energie	14
3.1	Wahl eines mobilen Energiespeichers	14
3.2	Akkumulatoren	15
3.2.1	Bleiakkumulatoren	15
3.2.2	Nickel-Cadmium-Akkumulatoren (NiCd)	16
3.2.3	Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NiMH)	17
3.2.4	Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkumulatoren (Li-Ion und Li-Polymer)	18
3.3	Kondensatoren	20
4	Thermogeneratoren	22
4.1	Anforderungen	22
4.2	Beschreibung und technische Daten	22
4.3	Theoretische Betrachtungen	24
4.3.1	Das thermische Ersatzschaltbild	24
4.3.2	Umgebung	25
4.3.3	Heizung	25
4.3.4	Wärmekapazitäten	26
4.3.5	Kühlkörper und Wärmeleiter als R-C-Glieder	26
4.3.6	Thermogeneratoren	27
4.4	Messungen mit den Thermogeneratoren	28

4.4.1	Messungen mit konstanter Temperaturdifferenz	28
4.4.2	Messungen mit konstantem Wärmeleistungsstrom	29
4.5	Messaufbau	30
4.5.1	Heizfolie	30
4.5.2	Kupferplatte als „Heat-Spreader“	30
4.5.3	Kühlkörper	31
4.5.4	Messgeräte	32
4.6	Erprobung des Messaufbaus und Vergleichsrechnung mit der Theorie	33
4.6.1	Temperaturmessungen	33
4.6.2	Spannungsmessungen	34
5	Entwicklung einer Schaltung zur Spannungsversorgung	38
5.1	Anforderungen an die Spannungsversorgung eines mobilen Ver- brauchers	38
5.2	Konzeptionelle Überlegungen	38
5.3	Technische Einzelheiten des MAXIM 1676	39
5.3.1	Beschreibung und Pinbelegung	39
5.3.2	Funktionsweise von DC-DC Konvertern	40
5.4	Beschaltung des MAXIM 1676 und Schaltungsvarianten	42
5.4.1	Grundschialtung	42
5.4.2	Verringern der Anlaufspannung mit einer Schottky-Diode .	43
5.4.3	Erhöhen der Solla Ausgangsspannung und Einfügen einer zu- sätzlichen Diode am Ausgang	44
5.4.4	Kaskadieren zweier DC-DC Konverter	45
5.4.5	Begrenzen des Ausgangsstromes	45
5.5	Beschreibung des Energiespeichers	46
5.6	Testen der Schaltungsvarianten	47
5.6.1	Grundschialtung	47
5.6.2	Ladezeitmessung mit der Grundschialtung	48
5.6.3	Ladezeit mit Schottky-Diode	49
5.6.4	Erprobung Kaskadenschaltung	50
5.6.5	Testen der Schaltung mit erhöhter Ausgangsspannung und zusätzlicher Diode	52
5.6.6	Begrenzen des Ausgangsstromes	53
5.6.7	Ändern von Bauteilwerten	53
5.6.8	Betriebszeit eines MICA-Netzwerkknoten	58
6	Zusammenfassung und Ausblick	60
	Literaturverzeichnis	63

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schuh mit Piezogeneratoren	10
2.2	Spannungsverlauf der Piezogeneratoren beim Gehen	11
2.3	Leistungsverlauf der Piezogeneratoren beim Gehen	12
2.4	Querschnitt durch ein Thermoelement	13
3.1	Entladekurve einer Li-Ion-Zelle	20
4.1	<i>TEG 100-40-40-4</i>	23
4.2	Spannungsquelle mit Innenwiderstand	24
4.3	Heizung modelliert als Wärmestromquelle	26
4.4	R-C-Glied	26
4.5	Ersatzschaltbild eines Thermogenerators	27
4.6	Die Kupferplatte mit aufgeklebter Heizfolie	31
4.7	<i>TEG 100</i> zwischen Kupferplatte und Kühlkörper	32
4.8	Messaufbau ohne Ladeschaltung	33
4.9	Das thermische Schaltbild der Versuchsanordnung	34
4.10	Spannungsverlauf beim Einschalten der Heizung	36
4.11	Spannungsverlauf beim Ausschalten der Heizung	37
5.1	Der MAXIM 1676 im μ Max-Gehäuse im Größenvergleich	40
5.2	Ladephase des Kondensators	40
5.3	Ladephase der Induktivität	41
5.4	Vereinfachtes Blockschaltbild des <i>MAX 1676</i> (Quelle: Datenblatt <i>Maxim</i>)	42
5.5	Grundsaltung für 3,3 V Ausgangsspannung	43
5.6	Schaltung mit Schottky-Diode	44
5.7	Schaltung mit erhöhter Ausgangsspannung und Diode am Ausgang	44
5.8	Kaskadenschaltung mit zwei <i>MAXIM 1676</i>	45
5.9	Strombegrenzung auf 0,5 A	46
5.10	Speicherkondensator mit einer Kapazität von 1 F	47
5.11	Ladekurve mit idealer 1,5 V Spannungsquelle	49
5.12	Ladekurve mit Alkaline-Batterie	49
5.13	Laden mit den TEG 100 bei 7,3 W Heizleistung	50
5.14	Laden mit den TEG 100 bei 10,8 W Heizleistung	50

5.15	Anlaufspannung mit und ohne Schottky-Diode	51
5.16	Laden mit der Kaskadenschaltung bei 10,8 W Heizleistung	52
5.17	Laden mit begrenztem Ausgangsstrom (0,5 A)	53
5.18	Bauteilgröße zweier Induktivitäten mit 22 μH und 40 μH	54
5.19	Ladezeit mit größerer Induktivität	55
5.20	Spannungsverlauf am Schaltungseingang bei $L = 22 \mu\text{H}$	55
5.21	Spannungsverlauf am Eingang des <i>MAXIM 1676</i> bei $L = 22 \mu\text{H}$	56
5.22	Spannungsverlauf am Eingang des <i>MAXIM 1676</i> bei $L = 40 \mu\text{H}$	57
5.23	Ladekurve mit vergrößerter Induktivität und 7,3 W Heizleistung	57

Tabellenverzeichnis

2.1	Wärmeabgabe des menschlichen Körpers	5
2.2	Wärmeabgabe verschiedener Körperregionen	6
2.3	Wirkungsgrade bei Solarzellen	8
3.1	Technische Daten Bleiakku	15
3.2	Technische Daten NiCd Akkumulator	16
3.3	Technische Daten NiMH-Akku	18
3.4	Technische Daten Lithium-Akkumulatoren	20
3.5	Technische Daten Speicherkondensatoren	21
4.1	Technische Daten des <i>TEG 100</i>	23
4.2	Weitere elektrische Eigenschaften des <i>TEG 100</i>	24
4.3	Elektrisches Ersatzschaltbild	25
4.4	Messungen der Kupfertemperaturen	34
4.5	Messungen der Leerlaufspannung	35
5.1	Pinbelegung des DC-DC Konverters	39
5.2	Bauteile der Grundschialtung	48
5.3	Bauteile der Grundschialtung zum Laden des Speicherkondensators	48
5.4	Bauteile der Schaltung mit Schottky-Diode	50
5.5	Bauteile der Kaskadenschaltung	51
5.6	Bauteilliste mit vergrößerter Induktivität	54
5.7	Strom- und Leistungsbedarf des <i>MICA</i> -Knotens	58
5.8	Betriebszeiten des <i>MICA</i> -Knotens	58
5.9	Zusammenfassung Ladezeiten	59

1 Einleitung

Ambient Intelligence (*AmI*) bezeichnet eine intelligente Umgebung, die sensitiv und adaptiv auf die Anwesenheit von Menschen und Objekten reagiert und dabei dem Menschen vielfältige Dienste leistet. So definiert der Fachbereich Elektro- und Informationstechnik der *TU Kaiserslautern* den Begriff, der seit 2003 einem eigenen Forschungsschwerpunkt der Universität den Namen gibt. In dem Forschungsschwerpunkt sind derzeit die Studenten, Mitarbeiter und Professoren von 12 Lehrstühlen aus den Fachbereichen Elektro- und Informationstechnik, Informatik, Maschinenbau und Verfahrenstechnik und Sozialwissenschaften vertreten.

Was ist nun *Ambient Intelligence* genau? Wie in der Definition bereits angedeutet, ist *AmI* eine intelligente Umgebung, die dem Menschen Dienste leisten soll. Welche Art von Diensten ist dabei vorstellbar? Der Mensch soll bei Arbeit, Freizeit und im Alltag unterstützt werden. Dafür wird - zunächst allgemein formuliert - Technik benötigt. Die technologische Basis von *Ambient Intelligence* ist ein Netzwerk mobiler Knoten. Diese mobilen rechnenden Knoten sammeln Daten von Sensoren. Die Daten werden verarbeitet und die Informationen an Aktuatoren, welche auf die Umgebung einwirken, weitergegeben.

Mittelfristig arbeiten die Wissenschaftler dieses Forschungsschwerpunktes an drei Szenarien:

- *Assisted Training*
- *Assisted Living*
- *Assisted Working*

Assisted Training beschäftigt sich mit der Unterstützung des Trainings im Radsport. Trainingsdaten werden von einem Trainerknoten gesammelt und ausgewertet.

Im Szenario *Assisted Living* geht es hauptsächlich um die Vernetzung von Geräten des alltäglichen Bedarfs, vom Notrufsystem bis zu reinen Komfortfunktionen.

Assisted Working wiederum setzt mobile Netzwerke in verschiedenen Arbeitsbereichen ein.

Nach dieser kurzen Vorstellung des Forschungsbereichs *Ambient Intelligence* wird schnell klar, dass hier mobile Netzwerkknoten in großer Anzahl zum Einsatz kommen. Diese haben einen Energiebedarf, der zuverlässig und kostengünstig zu decken ist. Tragbare Energiequellen bzw. Energiespeicher sind nach einer gewissen Betriebszeit erschöpft. Eine sich regenerierende Energieversorgung ist aus diesem Grund wünschenswert. Lästiges Nachladen oder Tauschen von Batterien entfielen dann. Gemäß dem „Sorglos-Prinzip“ müsste man sich vor und während des Einsatzes der Geräte nicht um ihre Energieversorgung kümmern.

In dieser Arbeit werden Möglichkeiten zur Energiegewinnung für *AmI*-Systeme untersucht. Besonderer Wert wird dabei auf die direkte Energiegewinnung im Umfeld des menschlichen Körpers gelegt. Zunächst werden die Leistung des Menschen und die verschiedenen Energieformen, die zur Umwandlung in elektrische Energie zu Verfügung stehen, beurteilt. Zudem werden Methoden zur elektrischen Energieumsetzung eingehend betrachtet. Dabei sind besonders moderne Verfahren, wie sie bei zur Zeit noch wenig angewandten Piezo- und Thermogeneratoren zur Anwendung kommen, erforschenswert.

Da am *Massachusetts Institute of Technology* bereits piezoelektrische Generatoren eingehend betrachtet worden sind, wird hier besonderes Augenmerk auf thermoelektrische Elemente gerichtet, mit denen Wärme direkt in Elektrizität umgewandelt werden kann. Der als relativ neu geltende Weg der thermoelektrischen Energiegewinnung wird nach Auswahl geeigneter Thermoelemente eingehend geprüft. Der Motivation liegt das Szenario *Assisted Training* zugrunde: Im modernen Leistungssport, zum Beispiel im Radsport, werden eine Reihe von Sensoren eingesetzt, wie u. a. Drucksensoren zur Leistungsmessung, Pulsmesser, Trittfrequenzmesser usw. Die Sensoren bilden gemeinsam mit *MICA*-Knoten von *Crossbow*, welche die gewonnenen Trainingsdaten verarbeiten und weiterleiten, ein mobiles Netzwerk, dessen Komponenten auf eine Spannungsversorgung angewiesen sind. Um nun dieses Netzwerk auf thermoelektrischem Wege mit Energie zu beliefern, gilt es, die Leistungsausbeute der Thermoelemente zu erkunden und eine Schaltung zu entwickeln, die einen Energiespeicher so lädt, dass ein Netzwerkteilnehmer für einige Zeit betrieben werden kann. Der *MICA*-Knoten, der im betrachteten *AmI*-Szenario verwendet wird, dient zu Testzwecken dann als Stromverbraucher und wird mit der entwickelten Schaltung betrieben. Dabei werden die erreichbaren Betriebszeiten gemessen und aufgezeichnet.

2 Möglichkeiten zur elektrischen Energiegewinnung

In diesem Kapitel wird ein Überblick gegeben, welche nutzbaren Arten von Energie am menschlichen Körper vorhanden sind und welche Möglichkeiten bestehen, diese Energie in elektrische umzuwandeln. Zwei Arten von Energie, mechanische und thermische, werden dabei untersucht und die Leistung abgeschätzt. In Abschnitt 2.2 werden dann mehrere Verfahren der Energiewandlung beschrieben und mit Beispielrechnungen verglichen.

2.1 Energiequellen am menschlichen Körper

2.1.1 Mechanische Energie

Der Mensch kann mechanische Leistung abgeben. Seine Muskeln sind in der Lage, biochemische Energie in mechanische umzusetzen. Eine genaue Betrachtung der Vorgänge würde den Rahmen hier deutlich sprengen. Deshalb wird im folgenden nur die tatsächliche mechanische Leistung, die mit den Gesetzen der Mechanik leicht zu ermitteln ist, genauer betrachtet.

So vielfältig wie Bewegungen, die ein Mensch durchführen kann, so vielfältig sind auch die Möglichkeiten, mechanische Körperbewegungen für die Energiegewinnung zu nutzen. So ließen sich Bewegungen an jedem Gelenk nutzen. Welche Gelenke dabei bewegt werden und in welcher Art sie bewegt werden wird letztendlich von der Tätigkeit des Menschen bestimmt. Besonders beim Gehen oder Laufen sind sehr viele Körperteile und Gelenke in Bewegung. Denkbar wäre besonders die Nutzung an Hüfte, Knien, Fußgelenken und an den Ellenbogengelenken. Außer den Gelenkbewegungen lassen sich verschiedene Beschleunigungsbewegungen, die an Beinen und Armen auftreten, verwerten. Bekannt sind Uhren, die mit einem Pendel bzw. einem Rotor die Beschleunigung der Arme während des Gehens ausnutzen, um genügend elektrische Energie, die dann noch zwischengespeichert wird, für den dauerhaften Betrieb zu erzeugen. Obwohl bei einer Tätigkeit wie dem Gehen die mechanische Leistung durchaus groß erscheint, bleibt ein Nachteil: In der Ruhe wird ein Mensch auch keine mechanische Leistung abgeben. Die

Energiegewinnung ist verständlicherweise von der Tätigkeit des Menschen stark abhängig.

Sieht man sich nun die Bewegungen an Fuß und Fußgelenk genauer an, wird man einerseits beim Gehen eine Bewegung am Knöchel feststellen, andererseits die Abrollbewegung des Fußes und dabei ein abwechselndes Zu- und Abnehmen des Drucks auf Ferse und Fußballen. Diese Fußbewegungen sind bei den Arbeiten am *Massachusetts Institute of Technology* detailliert ausgenutzt worden (siehe Abschnitt 2.2.3, [Ken98] und [Par98]).

Die mechanische Leistung die ein Mensch vollbringen kann, ist grob abzuschätzen, wenn man die potentielle Energie zur Überwindung eines Höhenunterschieds der Rechnung zugrunde legt. Ein Beispiel aus dem täglichen Leben ist das Treppensteigen. Denkbar ist auch, die mechanische Leistung mit Hilfe von Fitnessgeräten, welche entsprechende Einstellmöglichkeiten für verschiedene sportliche Belastungen besitzen, zu messen. Mit der Hilfe von solchen Geräten kann sogar die Leistungsfähigkeit einzelner Muskelgruppen einigermaßen genau bestimmt werden. Da ein Mensch aber im Gegensatz zu einer Maschine ermüdet und seine Höchstleistung nur kurz abgeben kann, ist es schwierig genaue Angaben zur Dauerleistung eines Menschen zu machen. Klar ist jedenfalls, dass die Dauerleistung weit unter der kurzfristigen Höchstleistung liegt. Auch der Trainingszustand des Sportlers spielt natürlich eine große Rolle. Die Angabe eines Leistungsbereichs genügt hier aber völlig, da nur eine Abschätzung gemacht werden soll. Eine kleine Beispielrechnung:

$$\begin{aligned} \text{Leistung} &= \frac{\text{Kraft} \cdot \text{Weg}}{\text{Zeit}} = \frac{F \cdot s}{t} \\ P &= \frac{m \cdot g \cdot s}{t} \end{aligned}$$

Angenommen, ein Mensch wiegt 70 kg und würde pro Sekunde beim Treppensteigen 1 m Höhenunterschied überwinden, so ist seine Leistung:

$$P = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 70 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ s}} = 686,7 \text{ W}$$

Wie diese kleine Rechnung zeigt, wird die mechanische Höchstleistung, die ein Mensch für kurze Zeit erbringen kann, in dem Bereich von 600 W bis 1000 W liegen. Der mechanische Wirkungsgrad wird in der Literatur mit $\eta = 10\%$ bis 20% angegeben. Die Dauerleistung liegt im Bereich 80 W bis 300 W. Spitzensportler können diese Werte weit überschreiten.

Als abschließendes Beispiel wird hier gezeigt, wie sich die Leistung einer einzelnen Muskelgruppe berechnet: Ein Athlet hebt eine 10 kg Hantel 20 cm an. Er macht 30 Wiederholungen pro Minute.

$$P = 30 \cdot \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 10 \text{ kg} \cdot 0,2 \text{ m}}{60 \text{ s}} = 9,81 \text{ W}$$

Bei den vielversprechenden Leistungswerten darf jedoch eines nicht vergessen werden: Die Energieerzeugung am Körper soll den Komfort nicht beeinträchtigen. Ob es also Sinn macht, den Nutzer eines mobilen Netzwerkes zu sportlichen Höchstleistungen zu zwingen, sei dahingestellt. Im *AmI*-Szenario *Assisted Training* werden sowieso sportliche Leistungen erbracht, so dass die Nutzung mechanischer Energie sinnvoll erscheint. Die Frage, ob der Sportler einen Teil seiner mechanischen Leistung für die elektrische Energieerzeugung aufbringen will, bleibt bestehen.

2.1.2 Thermische Energie

Die Gesamtleistung, die ein Mensch abgibt, ist natürlich nicht rein mechanisch. Ungefähr 80 W müssen als Grundleistung für die Vitalfunktionen (Atmung, Puls, Körpertemperatur...) aufgebracht werden. Ein großer Teil wird als Wärmeleistung nach außen abgegeben. Diese Wärmeleistung ist besonders interessant, da sie für thermoelektrische Stromerzeugung nutzbar gemacht werden kann. Ein großer Teil dieser Wärmeleistung wird über die Haut abgegeben, ein weiterer Teil über die Atemwärme. Diese Untersuchung beschränkt sich auf die Wärmeabgabe der Hautoberfläche, die sicherlich leichter zu nutzen ist als Atemwärme. Auch hier soll eine Übersicht der verschiedenen Leistungsabgaben an unterschiedlichen Hautstellen eine Abschätzung ermöglichen.

Tätigkeit	Wärmestrom pro Fläche	Wärmestrom pro Person (1,8 m ² Körperoberfläche)
Liegen	46 W/m ²	82,8 W
Sitzen	58 W/m ²	104,4 W
Stehen	70 W/m ²	126 W
Langsam gehen (3 km/h)	140 W/m ²	252 W
Schnell gehen (5 km/h)	200 W/m ²	360 W
Bürotätigkeit	70 W/m ²	126 W
Leichte Tätigkeit (stehend)	93 W/m ²	167,4 W
Mittelschwere Tätigkeit (stehend, z. B. Hausarbeit)	116 W/m ²	208,8 W
Schwere Tätigkeit (z. B. Werkstattarbeit)	174 W/m ²	313,2 W

Tabelle 2.1: Wärmeabgabe des menschlichen Körpers (Quelle: ETH Zürich)

Die verschiedenen Körperregionen unterscheiden sich wegen der sehr unterschiedlichen Durchblutung auch in ihrer Wärmeabgabe. In der Regel geben stark durchblutete Körperregionen mehr Wärmeleistung ab als schwächer durchblutete.

Körperregion	Wärmestrom pro Fläche (Sitzen in Ruhe)
Durchschnitt	58 W/m ²
Kopf	115 W/m ²
Hände	75 W/m ²
Fußsohlen	bis zu 145 W/m ²

Tabelle 2.2: Wärmeabgabe verschiedener Körperregionen (Quelle: ETH Zürich)

2.2 Umwandlung in elektrische Energie

2.2.1 Energieumwandlung nach dem Generatorprinzip

Generatoren gehören zur Gruppe der rotierenden Maschinen und arbeiten nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion. Ein zeitlich konstantes Magnetfeld, das von einem Dauermagneten oder einer Erreger- bzw. Ständerwicklung aufgebaut wird, durchdringt eine sich drehende Wicklung, den Anker bzw. Läufer oder Rotor [NT98, S. 68].

Interessant für den Einsatz am Körper sind kleine Generatoren. Auch wenn die Verfügbarkeit von solch kleinen Generatoren nicht sehr groß ist, so werden sie doch von den Herstellern verschiedener Geräte eingesetzt. Allseits bekannt sind Dynamotaschenlampen in unterschiedlichen Formen und Armbanduhren, die mit Hilfe eines eingebauten Rotors, der einen Miniaturgenerator antreibt, die Bewegung des Unterarms in elektrische Energie umwandeln. Taschenlampen mit Dynamo lassen sich über einen Hebel antreiben, der Pumpbewegung des Nutzers in eine Drehbewegung wandelt. Auch sind Lampen mit Kurbel verfügbar. Erst seit kurzer Zeit sind auf dem Markt Modelle erhältlich, die einen stabförmigen Generator beinhalten. Hier wird ein Eisenkern in einer Spule beim Schütteln der Lampe bewegt und erzeugt elektrische Energie.

Da es die ersten Dynamolampen noch ohne Energiespeicher gab, musste die Energie ständig bei der Benutzung erzeugt werden. Heutzutage wird als Energiespeicher oft ein Akkumulator oder auch ein Speicherkondensator (Goldcap, Supercap) eingesetzt. Somit kann die Energieentnahme zeitlich unabhängig von der Erzeugung erfolgen. Darüber hinaus ist das Sammeln der Energie ein wichtiger Aspekt, wenn kurzzeitig mehr Energie benötigt als erzeugt wird.

Eine Abschätzung der Leistungsdichte gestaltet sich etwas schwierig, da Gene-

ratoren in allen möglichen Größen verfügbar sind. Der Wirkungsgrad η solcher kleinen Generatoren liegt zwischen 30 und 70 %.

2.2.2 Solarenergie

Die Solarenergie kam bereits in den 80er Jahren in mobilen Geräten zur Anwendung. Oft werden Solarzellen in kleinen Taschenrechnern verwendet, die sich wegen ihres geringen Leistungsbedarfs bei Zimmerbeleuchtung betreiben lassen. Es gibt sehr viele Möglichkeiten für die Anwendung von Solarenergie. Von der Armbanduhr über den Taschenrechner bis zur Photovoltaikanlage und zum Solar-kraftwerk gibt es heute Anlagen in allen Größen. Erneut ist hier die Energiemenge von Interesse, die Solarzellen für mobile Anwendungen liefern können.

Solarzellen und Solarmodule

Der grundsätzliche Aufbau einer Solarzelle soll hier erläutert werden. Die klassische Silizium-Solarzelle besteht aus einem p-n-Übergang. Eine nur ca. 0,02 mm dicke Schicht aus n-leitenden Silizium wird auf ein p-leitendes Substrat aufgebracht. Die Anordnung der Schichten kann prinzipiell auch umgekehrt sein, nur die Polarität der Zelle ändert sich. Wie bei jedem p-n-Übergang bildet sich eine Raumladungszone aus, da die freien Elektronen aus dem n-Bereich freie Löcher im p-Bereich besetzen. Über ihr liegt die Diffusionsspannung U_D . Bei Beleuchtung der Solarzelle werden die Atome des Kristallgitters angeregt und setzen Valenzelektronen frei. Die herausgeschlagenen Elektronen werden von der Diffusionsspannung in den n-dotierten Bereich getrieben, die Löcher in den p-dotierten Bereich. Dieser Vorgang setzt sich fort, bis die durch die Ansammlung der Elektronen und Löcher neu gebildete elektrische Spannung ebenso groß ist wie die Diffusionsspannung. Die Zelle hat dann ihre Leerlaufspannung erreicht. Sie liegt bei ungefähr 600 mV. Durch die Bestrahlungsstärke wird sie wenig beeinflusst. Der Kurzschlussstrom und damit die elektrische Leistung hingegen hängen annähernd linear mit der Bestrahlungsstärke zusammen, da sich durch stärkere Bestrahlung die Anzahl der freiwerdenden Elektronen vergrößert [Köt96]. Die Belastung mit einem ohmschen Lastwiderstand kann so erfolgen, dass sich der Arbeitspunkt im Punkt maximaler Leistungsabgabe befindet. Dieser Arbeitspunkt heißt auch MPP (Maximum Power Point).

Da die Ausgangsspannung einer einzelnen Solarzelle zu niedrig ist, werden ausreichend viele Zellen in Reihe geschaltet und zu einem Modul zusammengefasst. Idealerweise wird die Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen so gewählt, dass die Verbraucherspannung um den MPP liegt. Für Solarmodule ist eine Nennspannungsreihe, basierend auf der Zellspannung eines Bleiakkumulators (2 V),

geschaffen worden.

Arten von Solarzellen und Wirkungsgrad

Die weltweit größten Marktanteile haben kristalline Siliziumzellen. Sie werden als teurere monokristalline und günstigere polykristalline Zellen mit geringerem Wirkungsgrad angeboten. Hochleistungssolarzellen sind recht teure monokristalline Zellen, die durch aufwändige Technologien bei Kontaktierung und Oberflächenbeschichtung optimiert sind. Dünnschichtsolarzellen bestehen aus amorphem Silizium, CIS ($CuInSe_2$) oder Cadmium-Tellurid. Ihr Wirkungsgrad ist geringer, aber sie sind deutlich einfacher und damit günstiger herzustellen als kristalline Zellen. In Tabelle 2.3 ist ein Überblick zu den Wirkungsgraden gegeben.

Zellentyp	Zellwirkungsgrad η_Z	Modulwirkungsgrad η_M
Hochleistungszellen	19,5 %	17,0 %
Monokristallines Silizium	18,0 %	14,2 %
Polykristallines Silizium	16,0 %	14,0 %
amorphes Silizium	7,5 %	7,0 %
CIS	14,0 %	10,0 %
Cadmium-Tellurid	10,0 %	9,0 %

Tabelle 2.3: Wirkungsgrade bei Solarzellen (Quelle: Deutsche Gesellschaft für Solarenergie)

Leistungsausbeute bei Verwendung von Solarzellen

Es bleibt nun ein Blick auf die erzielbare Leistung mit Hilfe von Solarzellen. Zunächst muss hierzu ermittelt werden, wieviel Licht auf die Erde fällt und wieviel davon photovoltaisch nutzbar ist. Natürlich hängt die einfallende Lichtmenge sehr stark von den momentanen Wetterbedingungen (Bewölkung), der Jahres- und Tageszeit und der geographischen Breite ab. Die Intensität beträgt in Mitteleuropa an einem wolkenfreien Sommertag mittags ungefähr 900 W/m^2 . Dieser Wert kann bei stärkerer Bewölkung rasch auf nur 100 W/m^2 oder weniger sinken.

Die jährliche Energiemenge, die als Strahlung auf die Erde fällt, schwankt sehr stark von Ort zu Ort. Selbst in Mitteleuropa bewegen sich die Werte in einem Bereich von 950 kWh/m^2 bis 1700 kWh/m^2 . Der Wert in der Sahara ist mit 2300 kWh/m^2 gar nicht soviel höher, als er zu erwarten gewesen wäre. Der Anteil der tatsächlich für die Solarzellen nutzbaren Lichtenergie liegt bei etwa 95 %. Meist wird auch noch ein Teil der Energie in den elektrischen Regelungsanlagen benötigt. Für eine

Beispielrechnung soll der Wert 1000 kWh/m^2 genügen. Geht man nun von einem Wirkungsgrad der Solarzellen von 15 % aus, so ließe sich in Mitteleuropa die elektrische Energie von 150 kWh/m^2 „ernten“.

Zurück zu den Möglichkeiten der Energiegewinnung am menschlichen Körper. An Kleidungsstücken könnten Solarzellen in der Größenordnung von Quadratdezimetern Platz finden. Auf dem vorderen Teil eines Schuhs ließen sich leicht 10 cm^2 bis 25 cm^2 nutzbare Solarfläche realisieren. An einem bewölkten Tag im Sommer wäre die Leistungsausbeute

$$100 \text{ W/m}^2 \cdot 0,0025 \text{ m}^2 \cdot 15\% = 37,5 \text{ mW}$$

möglich. Diese kleine Beispielrechnung soll nur zeigen, in welcher Größenordnung die zu erwartende Leistung liegt. Da, wie oben beschrieben, die Einstrahlungsstärke sehr stark schwankt, wird auch hier schnell der Ruf nach einem wieder-aufladbaren Energiespeicher laut, der während des Aufenthalts im Freien geladen wird, um dann in Gebäuden den mobilen Verbraucher weiter zu versorgen.

2.2.3 Piezoelektrische Energiewandlung

Der Piezoelektrische Effekt beruht auf der Tatsache, dass es bei gewissen Kristallklassen unter mechanischem Druck zu einer Verschiebung der elektrischen Ladungen gegeneinander kommt. Sie weisen dann eine elektrische Ladung nach außen auf. Die Voraussetzung für das Vorhandensein des piezoelektrischen Effektes ist, dass der Kristall oder die Kristallklasse mindestens eine polare Achse aufweist. Dreht man die Enden einer polaren Achse um 180° , so ist die Lage der elektrischen Ladungen nicht mehr deckungsgleich mit der ursprünglichen Stellung. Bei mechanischem Druck von außen verschieben sich dann die Symmetriezentren der elektrischen Ladungen, und es entsteht ein elektrisches Feld.

1880 wurde Piezoeffekt von den Brüdern *Curie* entdeckt, und bereits 1881 wurde dessen Umkehrung von *Lippmann* prophezeit. Beim Anlegen eines elektrischen Feldes an einen piezoelektrischen Kristall ändert sich dessen Ausdehnung bzw. Form.

Das bekannteste piezoelektrische Material ist Quarz. Technisch genutzte Materialien, wie z. B. bestimmte Keramiken, weisen aber einen wesentlich stärkeren piezoelektrischen Effekt auf.

Die Anwendungen des piezoelektrischen Effektes sind vielfältig. In der Messtechnik werden sie als Drucksensoren eingesetzt. In der Aktuatorik erlauben Piezo-Positionierer präzise Bewegungen. Der inverse piezoelektrische Effekt kann auch in Lautsprechern eingesetzt werden. Bei vielen Tintenstrahldruckern wird die Tin-

te durch die Schwingungen eines Piezoelements zerstäubt. Zur Zeit beschäftigt sich die Autoindustrie damit, Magneteinspritzventile bei Diesel- und Benzinmotoren durch genauere und schnellere piezoelektrisch gesteuerte Einspritzventile zu ersetzen, um kommende Abgasnormen zu erreichen und den Verbrauch nochmals zu reduzieren. Dies sollen hier nur einige Beispiele für die Verwendung von Piezokristallen sein.

Die Nutzung des piezoelektrischen Effektes für die Energiegewinnung ist schon seltener. Bekannt sind natürlich Automatikfeuerzeuge und Gasanzünder, bei denen aus mechanischer Energie ein elektrischer Funke erzeugt wird, um das Gas zu entzünden. Dass Energiegewinnung für mobile Anwendungen mit Piezogeneratoren möglich ist, zeigen Forschungen am *Massachusetts Institute of Technology*. In Abbildung 2.1 ist eine Zeichnung eines mit Piezogeneratoren ausgestatteten Schuhs gezeigt, der 1998 am *Massachusetts Institute of Technology* entwickelt wurde.

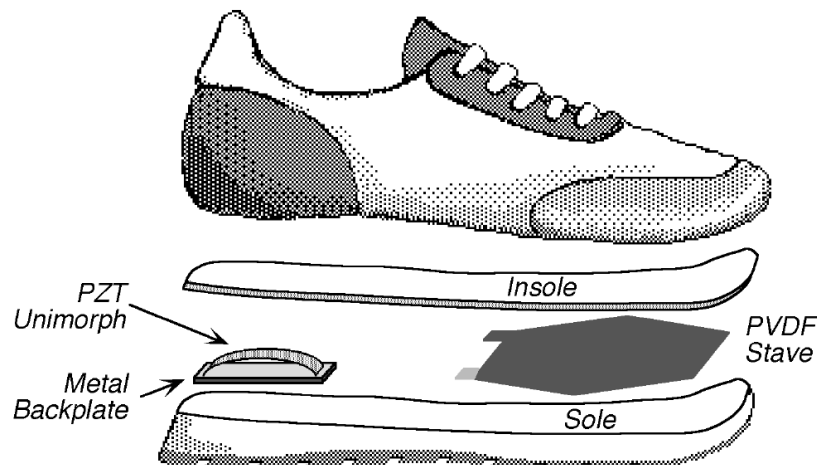


Abbildung 2.1: Schuh mit Piezogeneratoren (Quelle: [Par98])

Hier werden moderne piezoelektrischer Materialien geschickt in einen Sportschuh eingebaut, der schließlich beim Gehen eine durchschnittliche Leistung von bis zu 2,9 mW erzeugt. Zum Einsatz kommen hier zwei Materialien. Polyvinylidenfluoride (PVFD) sind Hochleistungskunststoffe, aus denen sich mehrschichtige piezoelektrische Folien herstellen lassen. Oft werden PVFD in der Sensortechnik eingesetzt. In den Arbeiten am *MIT* ([Par98] bzw. [Ken98]) wird eine mehrschichtige PVFD-Folie benutzt, um die Beugebewegungen im Bereich des Fußballens auszunutzen und in elektrische Energie umzuwandeln. Die Folie ist auf Streck- und Beugebewegungen hin optimiert. Der Wirkungsgrad η der Piezogeneratoren beträgt bis zu 20 % (siehe [She99]). Jedoch sinkt die Ausbeute durch die nachgeschaltete Elektronik zur Spannungsregelung. Die Diagramme 2.2 und 2.3 zeigen Spannungs- und Leistungsverlauf bei einer Schrittfrequenz von ungefähr einem

Hertz.

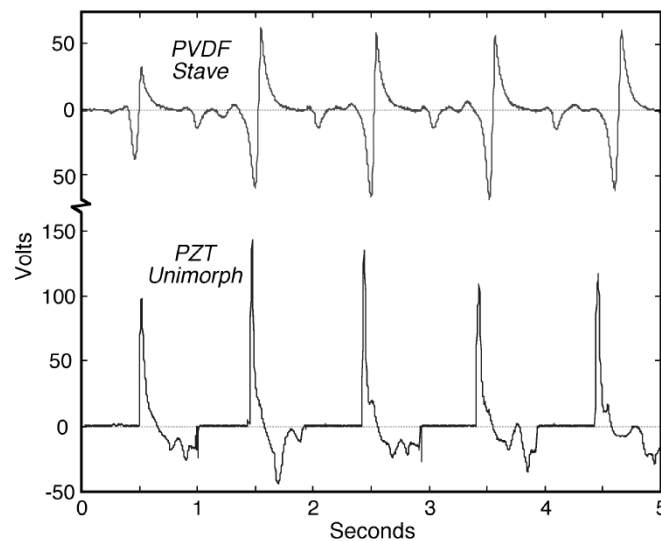


Abbildung 2.2: Spannungsverlauf Piezogeneratoren beim Gehen (Quelle: [Par98])

Als zweites Material kommt PZT (Blei-Zirkonium-Titanat) zum Einsatz. Es besitzt andere mechanische Eigenschaften als die PVDF-Folie. Das steife PZT-Element wird unter der Ferse eingesetzt, da hier der Druck beim Gehen am größten ist. Das PZT-Element liefert in etwa die doppelte Leistung der Folie. Durch diese geschickte Kombination aus der Folie vorne und dem PZT-Element unter der Ferse bleibt der Tragekomfort des Schuhs gut und stört den „Nutzer“ wenig.

2.2.4 Thermoelektrische Effekte

Der Seebeck-Effekt

An der Kontaktstelle zwischen zwei unterschiedlichen verlöteten oder verschweißten Metallen sind thermoelektrische Effekte zu beobachten. Werden die beiden Metalle auf unterschiedliche Temperaturen gebracht, entsteht eine Thermospannung. Diesen Effekt nennt man Seebeck-Effekt. In Thermoelementen kann er zur Temperaturmessung verwendet werden.

Die freien Elektronen in einem elektrischen Leiter befinden sich im obersten Band, dem sogenannten Leitungsband. Bei verschiedenen elektrischen Leitern liegen die Leitungsbander auf jeweils unterschiedlichen Energieniveaus. An der Kontaktstelle nehmen Elektronen aus dem Metall mit dem höheren Leitungsband die energetisch günstigere Position in dem Leitungsband des anderen Materials ein.

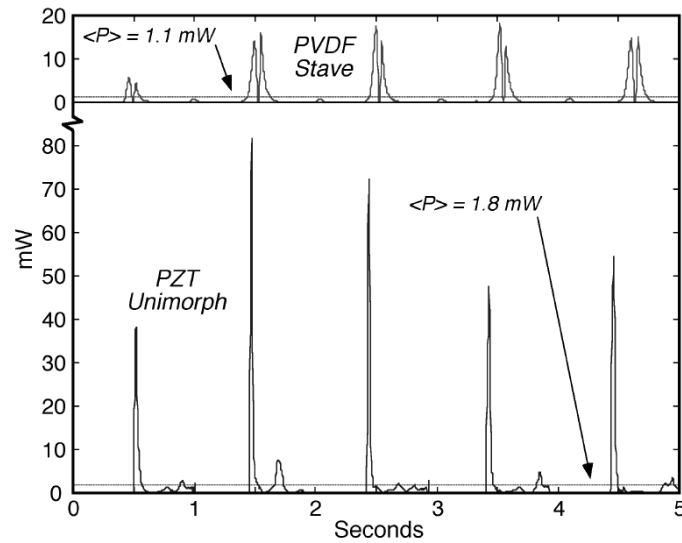


Abbildung 2.3: Leistungsverlauf der Piezogeneratoren beim Gehen (Quelle: [Par98])

Hierdurch entsteht ein elektrisches Feld. Nutzbar ist dies aber noch nicht. Bilden die beiden Leiter einen geschlossenen Stromkreis, so entsteht an der zweiten Kontaktstelle ebenfalls ein elektrisches Feld. Beide elektrische Felder gleichen sich aus. Nach außen lässt sich keine Spannung messen. Wird nun aber ein Material erwärmt, so nehmen die Elektronen Wärmeenergie auf und gelangen wieder in das höhere Leitungsband. An dieser Stelle wird das elektrische Feld kleiner. Eine Spannung ist messbar, und bei geschlossenem Stromkreis fließt ein Strom.

Peltier-Effekt

Beim Peltier-Effekt wirkt dieser Sachverhalt in umgekehrter Weise. Wenn eine Spannungsquelle einen Strom durch die Kontaktstelle bewirkt, nimmt jedes Elektron, welches die Kontaktstelle durchfließt, die Energiedifferenz der Leitungsbander in Form von Wärmeenergie auf. Die entsprechende Kontaktstelle wird kälter. Verlässt ein Elektron das höhere Leitungsband und fließt in das energetisch niedrigere Band, gibt es die Energiedifferenz in Form von Wärme ab. Die Wärmeenergie wird also von der einen auf die andere Seite transportiert. Da jedes Elektron eine bestimmte Wärmemenge aufnehmen kann, ist die Wärmemenge, welche insgesamt transportiert wird, proportional zum elektrischen Strom. Durch die Verlustleistung erwärmt sich der Leiter und schwächt die Kühlleistung eines Peltier-Elements.

Materialien und Thermoelemente

Thermoelemente bestehen aus vielen verschalteten Thermopaaren. Normalerweise kommen Halbleiter zum Einsatz. Oft besitzen die Elemente eine Keramikoberfläche oder sogar ein Keramikgehäuse. Manchmal bilden auch direkt die mit Kupfer verbundenen Kontaktstellen die Oberfläche. Die elektrischen Anschlüsse sind nach außen geführt.

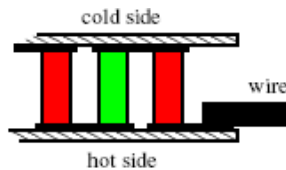


Abbildung 2.4: Querschnitt durch ein Thermoelement (Quelle: EURECA GmbH)

Eine weitere Beschränkung ist, dass die Materialien selbst Wärme leiten. Der Wärmestrom von der kalten zur warmen Seite verringert ebenfalls die Temperaturdifferenz. Gesucht werden also Materialien, die sowohl eine hohe elektrische Leitfähigkeit aufweisen als auch eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit. Leider haben gute elektrische Leiter meist auch gute Wärmeleiteigenschaften. Verwendet werden heute dotierte Halbleitermaterialien. Für Thermoelemente können hier optimierte Materialien eingesetzt werden. Die Forschung bringt dafür neue Materialien hervor, deren thermoelektrische Effizienz ständig verbessert wird. In Zukunft dürften auch in diesem Bereich Fortschritte zu erwarten sein. Biegsame thermoelektrische Folien werden in den nächsten Jahren schon verfügbar sein und der Thermoelektrizität den Weg zur Verwendung in Kleidungsstücken ermöglichen.

Zur Zeit werden thermoelektrische Effekte hauptsächlich in Peltier-Elementen zur Kühlung verwendet. Die Einsatzgebiete von Peltier-Elementen sind nahezu unerschöpflich. Sie werden eingesetzt in Kühlboxen, Kühlbehältern, bei der CPU-Kühlung usw.. Verfügbar sind Peltier-Elemente in allen möglichen Größen und Leistungsbereichen. Nicht zu vergessen ist allerdings, dass ein Peltier-Element nur als Wärmepumpe agiert. Die Wärmeenergie muss auf der anderen Seite mit Hilfe eines Kühlers abgeführt werden. Ihre Effizienz ist allerdings mit einem Wirkungsgrad von nur bis zu $\eta = 10\%$ gering, da nicht die ganze Energie zur Elektrizitätserzeugung bzw. zum Wärmetransport verwendet werden kann.

In Kapitel 4 werden Thermogeneratoren eingehend untersucht.

3 Speichern elektrischer Energie

3.1 Wahl eines mobilen Energiespeichers

Wie bereits in Kapitel 2 aufgezeigt, kann die benötigte elektrische Energie für den Betrieb eines elektrischen Verbrauchers nicht ständig bereitgestellt werden. Bei Spitzenlast fordern die Verbraucher mehr Energie an, als gleichzeitig erzeugt werden kann. Beides zusammen macht die Verwendung eines Energiespeichers und die Möglichkeit, Energie zu sammeln, nötig.

Hier soll eine Auswahl von geeigneten Energiespeichern getroffen werden. Untersucht werden verschiedene Arten von Akkumulatoren und Kondensatoren, insbesondere Goldcap-Kondensatoren, die sehr hohe Kapazitäten im Bereich von mehreren Farad bieten. Ihr Aufladen ist im Gegensatz zu Akkumulatoren unkompliziert. Obwohl ganze Bücher über Akkumulatoren geschrieben wurden, soll hier nur eine kurze Zusammenfassung der für diese Arbeit relevanten Eigenschaften der Energiespeichersysteme gegeben werden. Es werden die chemischen Reaktionen in der Zelle kurz aufgeführt und danach jeweils die technischen Daten und Eigenschaften der Energiespeicher.

Zunächst aber noch die Anforderungen, die an einen geeigneten Energiespeicher gestellt werden:

- hohe Energiedichte
- geringes Gewicht
- kleines Volumen
- einfache und schnelle Lademöglichkeit
- hohe Lebensdauer (Anzahl der Ladezyklen) und große Robustheit
- geringer Preis
- Umweltfreundlichkeit
- guter Ladefaktor (Verhältnis von zugeführter zu entnehmbarer Energie)

Der folgende grobe Vergleich soll die Auswahl und das Finden eines guten Kompromisses ermöglichen.

3.2 Akkumulatoren [TR98b]

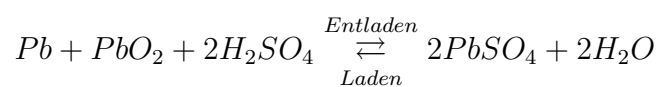
3.2.1 Bleiakkumulatoren

Der Bleiakkumulator wurde bereits um 1860 erfunden und dominiert noch heute, weil er ständig weiterentwickelt wurde, das Feld der Starter- und Notstrombatterien [TR98a]. In den letzten 20 Jahren wurden nahezu alle Teile des Bleiakkumulators neu entworfen, so dass heute wartungsfreie Akkus verfügbar sind.

Die Lebensdauer eines modernen Bleiakkus beträgt an die 15 Jahre bei bis zu 2000 Ladezyklen unter optimalen Ladebedingungen. Unter den heute üblichen Umständen hält eine Starterbatterie im Automobil ca. 4-7 Jahre. Vorteilhaft sind die hohe Zellenspannung und die große Strombelastbarkeit. Deutliche Nachteile sind das hohe Gewicht und die lange Ladezeit. Bei Energie- und Leistungsdichte (siehe 3.1) bleiben sie hinter anderen Akkutypen zurück. In elektrischen Haushaltsgeräten werden Bleiakkus aufgrund ihres Gewichtes und Volumens kaum eingesetzt. Sie sind handelsüblich kaum unter 300 g Gewicht zu bekommen. Ökologisch schädlich sind Bleiakkus nicht, wenn sie dem Recycling zugeführt werden. Sie sind fast vollständig wiederverwertbar.

Wegen der genannten Nachteile sind Bleiakkumulatoren deshalb für eine Anwendung am menschlichen Körper ungeeignet. Für mobile Anwendungen besitzen andere Akkutypen bessere Eigenschaften.

Die Lade- und Entladereaktion des Bleiakkumulators:



Spezifische Energie	Energiedichte	Leistungsdichte		Lebensdauer
(Wh/kg)	(Wh/l)	(Wh/kg)	(Wh/l)	Zyklen
30-35	100	50-100	150-300	bis 2000

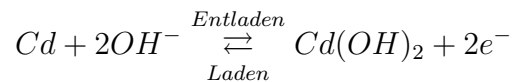
Tabelle 3.1: Technische Daten Bleiakku

3.2.2 Nickel-Cadmium-Akkumulatoren (NiCd)

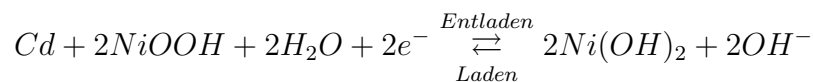
Nickel-Cadmium-Akkumulatoren sind üblich als Ersatz von Gerätebatterien. Sie sind deshalb auch in allen handelsüblichen Batteriegrößen erhältlich. Die Akkus basieren auf der Oxidation von metallischem Cadmium bei gleichzeitiger Reduktion von Nickel(III)Oxid-Hydrat in einem alkalischen Elektrolyt. Beim Laden läuft die Reaktion umgekehrt ab [TR98a].

Ihre Vorteile gegenüber von Bleiakkumulatoren sind hohe Energiedichte und große Robustheit. Jedoch muss man die im Vergleich zu Alkaline-Batterien etwas geringere Zellenspannung (1,2 V gegenüber 1,5 V) in Kauf nehmen. Nachteilig für Anwendungen, die sich durch ständiges Teilladen und Teilentladen auszeichnen, wirken sich der sogenannte Memory-Effekt und der Lazy-Battery-Effekt aus. Beim Memory-Effekt wird durch unvollständiges Entladen auf einer Elektrode eine intermetallische Phase gebildet; die Zellspannung sinkt. Der Effekt ist aber reversibel. Der Lazy-Batterieeffekt entsteht durch ständiges Laden wenig gebrauchter Zellen. Die Zellspannung sinkt, da die Akkus ständig überladen werden. Mit intelligenter Ladeelektronik lässt sich dieser Effekt verhindern. Aus ökologischer Sicht bedenklich ist das giftige Cadmium, weshalb die Zellen am Ende ihrer Lebensdauer dem Recycling zugeführt werden müssen [TR98a].

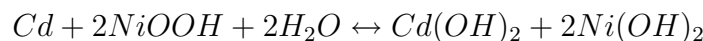
Chemische Reaktion an der Anode:



Kathode:



Eine grobe Vereinfachung der Gesamtreaktion ergibt:



Spezifische Energie	Energiedichte	Leistungsdichte		Lebensdauer
(Wh/kg)	(Wh/l)	(W/kg)	(W/l)	Zyklen
45-50	130	150-200	400-500	bis 1000

Tabelle 3.2: Technische Daten NiCd Akkumulator

3.2.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NiMH)

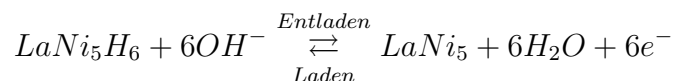
Mittlerweile hat der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NiMH-Akku) den Nickel-Cadmium-Akku im Bereich der Gerätebatterien wegen seiner zahlreichen Vorteile fast verdrängt. Dieser Akkutyp eroberte in kurzer Zeit einen signifikanten Weltmarktanteil [TR98a]. In den 80er Jahren wurden in Satelliten Nickel-Wasserstoff-Akkumulatoren eingesetzt. Der beim Laden entstehende Wasserstoff wird als Gas in der entsprechend druckfest ausgeführten Batterie gespeichert. Beim Entladen wird der Wasserstoff elektrochemisch zu Wasser oxidiert. Ende der 80er Jahre gelang es, Wasserstoff mit Hilfe einer festen Metall-Wasserstoff-Verbindung, dem sogenannten Hydrid, zu speichern. Heute verwendet man hierzu ein preiswertes lanthanhaltiges Mischmetall, so dass der innere Wasserstoffdruck einer Zelle äußerst gering ist [TR98b].

Vergleicht man den NiMH- mit dem NiCd-Akku, so besticht der NiMH-Akku durch seine um 40-60% höhere spezifische Energie und dem daraus resultierenden Gewichtsvorteil. Erhältlich ist er in denselben Größen wie der NiCd-Akku, also auch in allen Gerätebatteriegrößen. Seine Zellspannung, Lade- und Entladekurven sind dem NiCd-Akku sehr ähnlich. Im allgemeinen können deshalb auch die gleichen Ladegeräte verwendet werden, jedoch sollten diese mit der höheren Kapazität des NiMH-Akkus zurechtkommen. Um die Kapazität optimal zu nutzen, sind mikroprozessorgesteuerte Ladegeräte empfohlen. Einen Memory- oder Lazy-Batterie-Effekt haben NiMH-Akkus nicht.

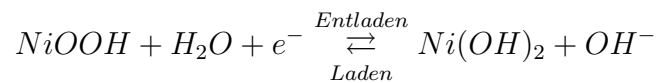
Nur bei sehr hohen Entladeströmen und bei tiefen Temperaturen bietet der NiCd-Akku noch Vorteile, weshalb er heute im Modellbau noch häufig anzutreffen ist. Weil der NiMH-Akkumulator kein giftiges Cadmium enthält, ist er umweltfreundlicher als der NiCd-Akku. Der Mehrpreis lohnt sich in der Regel schon wegen der höheren Kapazität. Bei allen mobilen Anwendungen ist der NiMH- dem NiCd-Akku vorzuziehen.

Ein Hersteller bietet seit dem 3. Quartal 2004 sogar eine NiMH-Zelle an, welche ihren Innendruck mit einer Messeinrichtung überwacht und an ein spezielles Ladegerät überträgt. Ladezeiten von nur 15 Minuten sind damit möglich. Für die Untersuchungen dieser Arbeit spielen solche kurzen Ladezeiten aber keine Rolle.

Chemische Reaktion an der Anode des NiMH-Akkumulators:



Die Kathodenreaktion lautet:



Spezifische Energie	Energiedichte	Leistungsdichte		Lebensdauer
(Wh/kg)	(Wh/l)	(W/kg)	(W/l)	Zyklen
50-70	170-250	100-200	250-500	bis 1000

Tabelle 3.3: Technische Daten NiMH-Akku

3.2.4 Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkumulatoren (Li-Ion und Li-Polymer)

Lithium-Akkumulatoren haben sich inzwischen zu den Standardakkumulatoren im Bereich mobiler Anwendungen entwickelt. Dies haben sie besonders ihrer hohen spezifischen Energie und dem kleinen Gewicht zu verdanken. Der Durchbruch gelang in den letzten Jahren, weil verschiedene technische Probleme erfolgreich gelöst wurden. Mit metallischem Lithium wie in den ersten kommerziellen Lithiumbatterien war ein Aufladen konstruktionsbedingt nicht bzw. nur sehr bedingt möglich. Es galt zudem, große Sicherheitsprobleme zu lösen, denn bei starker Beanspruchung oder Kurzschluss konnte die Batterie wegen der Reaktionsfähigkeit des Lithiums sogar explodieren. Erst die Entwicklung von speziellen Elektroden, Elektrolyten und einer Lösung des Sicherheitsproblems brachte die Lithium-Akkus endgültig auf die Siegerstraße bei Notebook-, Handy- und Camcorder-Batterien [TR98b].

Bei metallischen Lithium-Akkus wird beim Entladen Lithium zu Lithium-Ionen oxidiert, und beim Laden kehrt sich dieser Vorgang um. Bei Li-Ion-Akkus wird als negative Elektrode graphitähnlicher Kohlenstoff verwendet, in den sich die Li-Ionen beim Laden unter geringfügiger Volumenänderung einlagern können. Beim Entladen gibt die Kohlenstoffverbindung Elektronen an den Verbraucher ab, die Ionen wandern in das Elektrolyt ab und reduzieren die positive Elektrode (z. B. Lithium-Cobalt-Oxid).

Die Nennspannung einer Zelle beträgt hohe 3,6 V. Beim Entladen sinkt die Spannung von 4,2 auf 3,4 V. Jeder Akku besitzt ein druckfestes Gehäuse, ein Sicherheitsventil und eine spezielle Elektronik, die zu hohe Ströme verhindert. Diese Maßnahmen schlagen sich natürlich in einem höheren Preis im Vergleich zu NiMH-Akkus nieder.

Lithium-Polymer-Akkumulatoren sind ähnlich aufgebaut, besitzen aber ein gelartiges Polymerelektrolyt. So ist man nicht mehr auf die klassischen Metallgehäuseformen angewiesen. Lithium-Polymer-Akkus lassen sich in nahezu allen For-

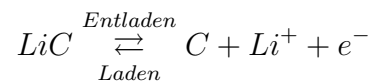
men realisieren. Komplizierte Hohlräume in mobilen Geräten lassen sich dadurch optimal ausnutzen [Hal02].

Die Vorteile liegen auf der Hand. Hohe spezifische Energie, geringes Gewicht und fast beliebige Formen machen Lithium-Akkus zu einer guten Wahl für mobile Anwendungen.

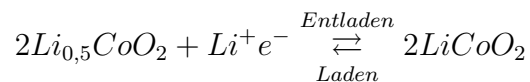
Einen Memory-Effekt kennen Lithium-Akkus nicht. Dennoch empfiehlt sich immer vollständiges Laden und Entladen. Obwohl Lithium-Akkus eine Lebensdauer von 500-1000 Zyklen und über 5 Jahren aufweisen können, versagen sie oft früher. So zählt bereits jedes kleine Aufladen, auch wenn es nur wenige Prozent der Akkukapazität sind, als vollständiger Ladezyklus. Dies führt in der Praxis dazu, dass vor allem bei Notebooks, die häufig am Netz betrieben werden, der Akku jedesmal lediglich um wenige Prozent geladen wird. Obwohl der Akku eigentlich gar nicht benutzt wird, altert er. Ein intelligentes Lademanagement kann dies verhindern, ist in der Praxis jedoch selten anzutreffen. Bei häufigem Teilladen und Teilentladen muss man also mit erhöhtem Verschleiß rechnen. Auch Temperaturen über 25 °C setzen den Lithium-Akkus zu, ihre Kapazität sinkt. In einem Notebook sind diese Temperaturen keine Seltenheit. Ein weiterer Grund für erhöhte Alterung [Wes03]. Lithium-Akkus haben somit eine deutlich geringere Selbstentladung von nur 5% im Monat. NiMH- oder NiCd-Akkus weisen hier bis zu 50% Selbstentladung pro Monat auf.

Ihre hohe Zellspannung ist einerseits ein großer Vorteil, macht sie aber andererseits als Gerätebatterie in den herkömmlichen Größen ungeeignet. Für jedes Gerät gibt es also eine spezielle Bauform. Sie brauchen spezielle Ladegeräte bzw. Ladeelektronik, die im Gerät oder im Akku integriert sein muss. Deshalb sind die Preise höher als beim NiMH-Akku.

Die Reaktion an der Anode einer Li-Ion-Batterie:



An der Kathode findet folgende Reaktion statt:



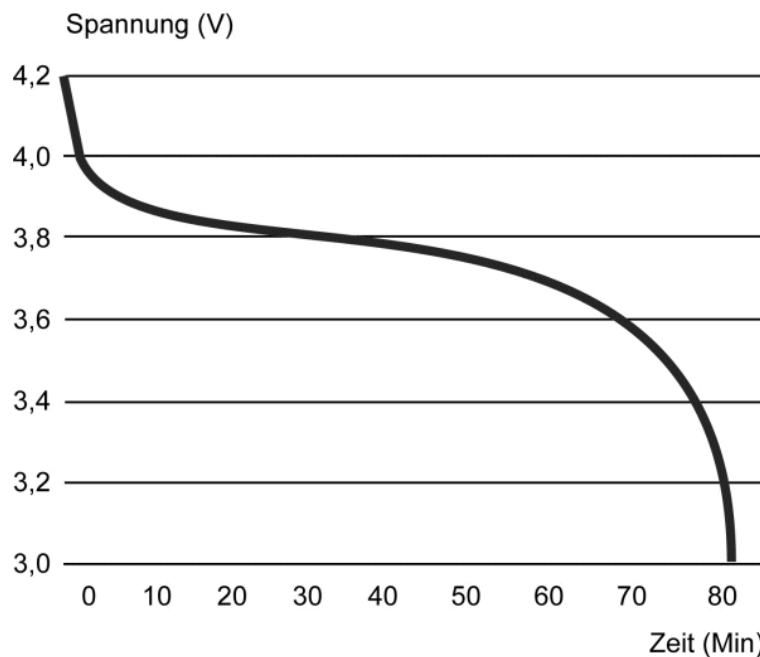


Abbildung 3.1: Entladekurve einer Li-Ion-Zelle (Quelle: [Hal02])

Typ	Spezifische Energie	Energiedichte	Leistungsdichte		Lebensd. Zyklen
	(Wh/kg)	(Wh/l)	(Wh/kg)	(Wh/l)	
Li-Ion	100-120	200-300	100-200	250-500	500-1000
Li-Pol.	85-140	50-170	120-200	150-400	500-1000

Tabelle 3.4: Technische Daten Lithium-Akkumulatoren

3.3 Kondensatoren

Die üblichen Kondensatoren, insbesondere Elektrolytkondensatoren, lassen sich aufgrund ihrer zu geringen Kapazität und hohen Selbstentladung kaum als Energiespeicher einsetzen. Hier soll dennoch untersucht werden, ob der Einsatz sogenannter Superkondensatoren (Speicherkondensatoren, Goldcaps, Ultracaps, Power-Kondensatoren) als Energiespeicher für den Betrieb des *MICA*-Knotens in Frage kommt. Sie bieten bei annähernd gleicher Baugröße Kapazitäten von mehreren Farad.

Zunächst sollen hier die Unterschiede zwischen den Energiespeichermechanismen der Akkumulatoren und der elektrochemischen Zellen aufgezeigt werden. Ein Akkumulator speichert die ihm zugeführte Energie, indem er sie auf elektrochemische Weise umwandelt. Kondensatoren speichern Ladung auf rein elektrostatische Weise. Ein Vergleich macht den Unterschied deutlich:

- $E_{Akku} = U \cdot I \cdot t$

Hingegen ist die Energie eines Kondensators nur:

- $E_{Kond} = \frac{1}{2}Q \cdot U = \frac{1}{2}C \cdot U^2$

Ein Kondensator kann demnach nur die Hälfte der Energie aufnehmen, die ein Akkumulator aufnehmen kann [HR96]. Sogenannte Speicherkondensatoren sind auch heute noch durch den von *Panasonic* eingeführten Handelsnamen *Goldcap* bekannt. Solche Speicherkondensatoren gibt es in Kapazitäten von bis zu 470 F. Ein Akkumulator speichert deutlich mehr. Dennoch gibt es einige Vorteile, die ein Kondensator gegenüber einem elektrochemischen Energiespeicher bietet. So ist sein Innenwiderstand deutlich geringer, und er lässt sich problemlos mit Strömen von bis zu 100 A laden und entladen. Die handelsüblichen Speicherkondensatoren haben eine maximale Betriebsspannung von bis zu 5,5 V, was für Anwendungen als Batterieersatz ausreicht. Da sie wie Elektrolytkondensatoren eingesetzt werden können, entfällt ein eventuell kompliziertes Ladeverfahren. Auch das Verhältnis von zugeführter zu entnommener Energie, welches bei NiCd-Akkus ca. 1,4 - 1,6 beträgt, fällt hier günstiger aus.

Eingesetzt werden Speicherkondensatoren als Memory-Backup-Stromversorgung, als Energieversorgung von stromsparenden Geräten und dort, wo kurzfristig hohe Ströme benötigt werden. Im Parallelbetrieb mit einer herkömmlichen Batterie, lässt sich bei kurzzeitigen Hochstrombelastungen sogar die Batterielebensdauer verlängern. Eine Batterie verliert bei hohen Strömen überproportional an Lebenszeit. Wenn ein Speicherkondensator diese Belastungen abfängt, lässt sich die Energie besser nutzen.

Zudem sind große Superkondensatoren in der Automobilindustrie auf Interesse gestoßen. In Verbindung mit Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen werden sie in Versuchsfahrzeugen als Energiepuffer benutzt [Dew04].

Spezifische Energie	Energiedichte	Leistungsdichte		Lebensdauer
(Wh/kg)	(Wh/l)	(W/kg)	(W/l)	Zyklen
1-10	ca. 1	100-1000	10-100	>20000

Tabelle 3.5: Technische Daten Speicherkondensatoren

4 Thermogeneratoren

4.1 Anforderungen

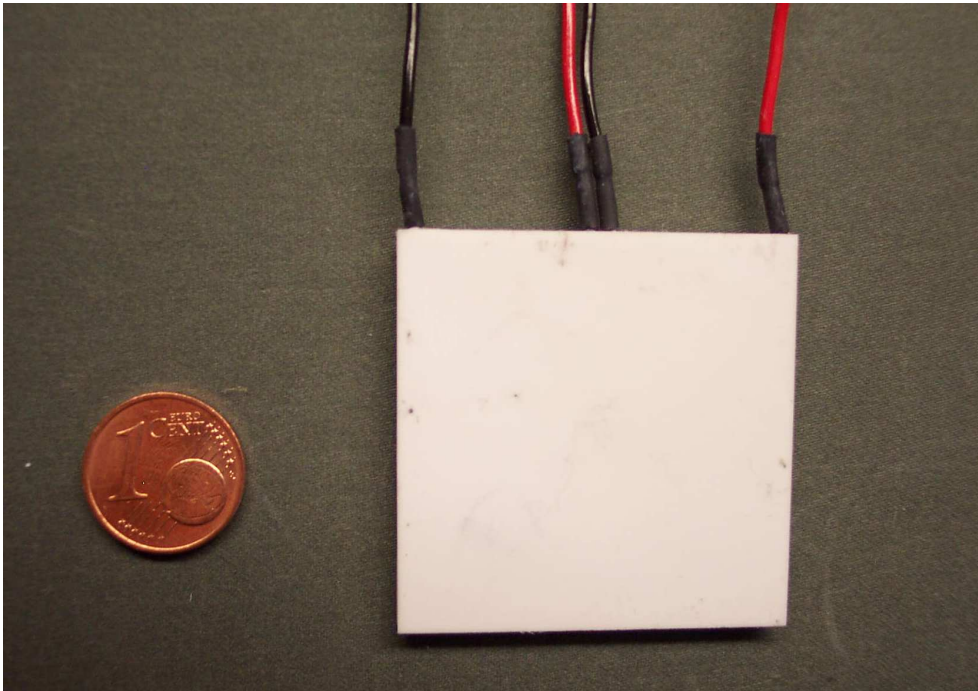
Die auszuwählenden Thermoelemente sollen natürlich eine relativ hohe elektrische Leistung abgeben und schon bei niedrigen Temperaturdifferenzen hinreichend funktionieren. Ihre Baugröße sollte den Einsatz in einer mobilen Anwendung möglich machen. Die Verfügbarkeit solcher auf Energieerzeugung ausgelegter Elemente am Markt ist derzeit noch sehr beschränkt. Angeboten werden Thermogeneratoren in Größenordnungen von Quadratmetern zum Einsatz an Heizkesseln, an denen eine Temperaturdifferenz ΔT von über 100 K möglich ist. Da diese Art von Thermogeneratoren für den mobilen Einsatz nicht in Frage kommt, hat sich die Suche auf Elemente im Größenbereich von Quadratzentimetern konzentriert. Nach einiger Zeit der Suche ist die Wahl auf den Thermogenerator *TEG 100-40-40-4* gefallen, im folgenden kurz *TEG 100* genannt, der von der Messtechnikfirma *Eureca GmbH* zur Verfügung gestellt wird. Seine Abmessungen von 40 mm x 40 mm bewegen sich in der gesuchten Größenordnung. Außerdem besitzt er zwei Stromkreise, so dass eine Seriell- oder eine Parallelschaltung möglich ist. Folglich befinden sich am Element vier Anschlüsse, zweimal Masse, zweimal V^+ , die entsprechend parallel oder seriell zu verschalten sind. Dies verspricht beim Messen die Möglichkeit, verschiedene Schaltungsvarianten zu erkunden.

4.2 Beschreibung und technische Daten

Neben den Abmessungen von 40 mm x 40 mm x 3,6 mm macht der Hersteller präzise Angaben zu den elektrischen und thermischen Eigenschaften. Eine Zusammenfassung steht in der nachfolgenden Tabelle 4.1.

Der Koeffizient α bestimmt die Leerlaufspannung bei einer bestimmten Temperaturdifferenz ΔT zwischen warmer und kalter Seite. Der Thermogenerator kann als Spannungsquelle mit Innenwiderstand betrachtet werden. Die Ausgangsspannung lässt sich dann durch die lineare Gleichung

$$U = \alpha \cdot \Delta T - I \cdot R_i \quad (4.1)$$

Abbildung 4.1: Der *TEG 100-40-40-4*

Element	Spannungs- koeffizient α	Innenwider- stand R_i	thermischer Wider- stand R_{th}
TEG 100 seriell	0,1055 V/K	6,890 Ω	1,6 K/W
TEG 100 parallel	0,528 V/K	1,723 Ω	1,6 K/W

Tabelle 4.1: Technische Daten des *TEG 100*

angeben. Mit Hilfe des thermischen Widerstandes R_{th} lassen sich Überlegungen am thermischen Ersatzschaltbild der Versuchsanordnung anstellen, wie in Kapitel 4.3 näher erläutert wird. Weitere elektrische Eigenschaften können nun für Tabelle 4.2 berechnet werden.

Bei der Handhabung muss prinzipiell dasselbe beachtet werden wie beim Gebrauch von herkömmlichen Peltierelementen. Die maximale Temperaturdifferenz sollte nicht überschritten werden. Die mechanische Belastung der Elemente darf nicht zu hoch sein. Wie bei Peltierelementen sind die Wärmezufuhr und -abfuhr entscheidend für die tatsächlich anliegende Temperaturdifferenz. Damit wird klar, dass ein Kühlkörper nötig ist, um die Wärmeabfuhr zu gewährleisten. Dabei muss für eine gute thermische Kopplung zwischen Element und Kühlkörper gesorgt sein. Inwiefern die Maßnahmen die Leistung der Thermogeneratoren beeinflussen, soll in den theoretischen Betrachtungen in Kapitel 4.3 genau untersucht werden.

Element	Leerlaufspannung U	Kurzschluss- Strom I	max. Leistung P bei $\Delta T = 100 \text{ K}$
TEG 100 (ser)	10,55 V	1,53 A	4,04 W
TEG 100 (par)	5,28 V	3,06 A	4,04 W

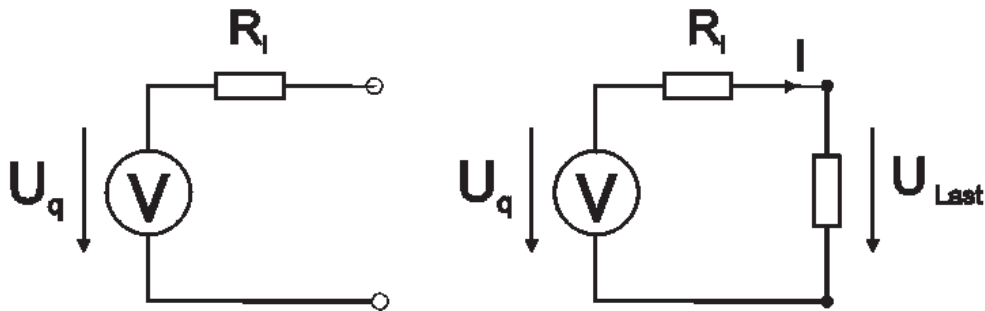
Tabelle 4.2: Weitere elektrische Eigenschaften des *TEG 100*

Abbildung 4.2: Spannungsquelle mit Innenwiderstand

Laut Datenblatt steigt die Effizienz des *TEG 100* mit der mittleren Temperatur der warmen und der kalten Seite $\frac{T_{\text{warm}} + T_{\text{kalt}}}{2}$. Wie weit diese Annahme zutrifft, vor allem bei niedrigen Temperaturdifferenzen, sollen die Messungen später zeigen.

4.3 Theoretische Betrachtungen

In diesem Abschnitt wird ein Überblick gegeben, wie sich die benötigten Zusammenhänge der Thermodynamik anhand eines thermischen Ersatzschaltbildes erläutern lassen. Mit den Ersatzschaltbildern sollen dann rechnerisch Werte für den Vergleich mit den gemessenen Werten ermittelt werden.

4.3.1 Das thermische Ersatzschaltbild

Mit Hilfe von Ersatzschaltbildern lassen sich besonders in der Modellbildung physikalische Anordnungen in ein elektrotechnisches Ersatzschaltbild überführen. Die Äquivalenzen sind hier in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Das Erstellen von Ersatzschaltbildern hat insbesondere für den Elektrotechniker den Vorteil, dass die Berechnung von Größen wie in einem elektrischen Schaltbild mit Hilfe von Knoten- und Maschengleichungen erfolgen kann. Die theoretischen Rechnungen sollen im folgenden schnell und verständlich mit Hilfe des thermischen Schaltbildes, welches für den Messaufbau erstellt wird, erfolgen.

th. Größe	Formelzeichen	Einheit	el. Größe	Formelzeichen	Einheit
Temperatur	T	K	Spannung	U	V
Wärmestrom	Φ, P_{th}	W	Strom	I	A
Wärmewiderstand	R_{th}	K/W	Widerstand	R	Ω
Wärmeleitwert	G_{th}	W/K	Leitwert	G	S
Wärmekapazität	$C = \frac{dQ}{dT}$	Ws/K	Kapazität	C	F

Tabelle 4.3: Elektrisches Ersatzschaltbild

Mit den verallgemeinerten Strom- und Spannungsvariablen kann mit einem thermischen System eine verallgemeinerte Netzwerkanalyse durchgeführt und das Netzwerk wie eine elektrische Schaltung berechnet werden. Im folgenden sind hier einige Bausteine eines thermischen Systems mit den verallgemeinerten Bauelementen modelliert.

4.3.2 Umgebung

Die Umgebung, die zweifelsohne in jedem thermischen System vorhanden ist, kann als ideale Spannungsquelle (Temperaturquelle) modelliert werden unter der Annahme, dass sich die Umgebungstemperatur auch bei Energieent- oder aufnahme nicht ändert. Ist der Laborraum groß genug und wird hier mit moderaten Wärmeleistungen von wenigen Watt gearbeitet, so dürfte diese Annahme zutreffen.

4.3.3 Heizung

Eine Heizung kann auf zwei Arten modelliert werden. Zum einem als verallgemeinerte Spannungsquelle, zum anderen als verallgemeinerte Stromquelle. Von einer Spannungsquelle mit konstanter Temperatur auszugehen erweist sich in der Praxis jedoch als schwierig. Selbst wenn der thermische Übergangswiderstand zum System bekannt wäre, müsste dann noch die „Leerlauf“-Temperatur gemessen werden.

Aus den obigen Überlegungen wird klar, dass eine Heizung als Stromquelle oder genauer Wärmestromquelle wie in Abbildung 4.3 einfacher modelliert werden kann. Da meist die Leistungsangabe der Heizung gegeben ist oder einfach aus der elektrischen Leistung, welche die Heizung aufnimmt, berechnet werden kann, ist das Modell in der Praxis leicht zu verwenden. Es wird davon ausgegangen, dass die Heizung einen festen Wärmestrom in das thermische System fließen lässt.

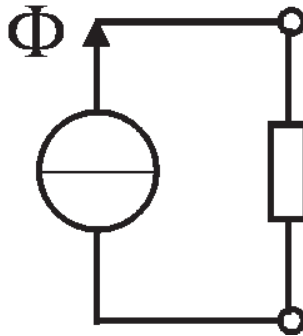


Abbildung 4.3: Heizung modelliert als Wärmestromquelle

4.3.4 Wärmekapazitäten

Jedes Bauteil eines thermischen Systems besitzt eine Wärmekapazität C mit der Einheit Ws/K . Sie liegt meist in einer Größenordnung, die nicht zu vernachlässigen ist. Befindet sich das System in einem stationären Zustand, so können jedoch alle Wärmekapazitäten vernachlässigt werden. Zu beachten ist, dass es eine gewisse Zeit benötigt, bis dieser Zustand erreicht ist und sich ein konstanter Wärmestrom einstellt.

4.3.5 Kühlkörper und Wärmeleiter als R-C-Glieder

Kühlkörper und Wärmeleiter stellen thermische R-C-Glieder dar. Da jeder Systemteil aus einem Material besteht, welches auch eine Wärmekapazität hat, wird man reine thermische Widerstände in der Realität nicht antreffen. Da meist nur der stationäre Zustand betrachtet werden muss, können die Kapazitäten vernachlässigt werden. Sie bestimmen aber natürlich die Zeit bis zum Einstellen einer stationären Wärmeströmung.

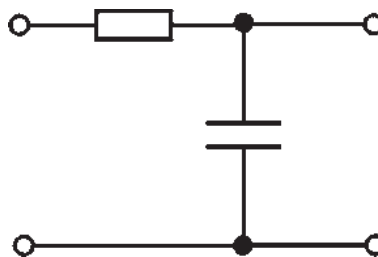


Abbildung 4.4: R-C-Glied

4.3.6 Thermogeneratoren

Der Thermogenerator *TEG 100* stellt ebenfalls ein solches R-C-Glied mit geringer Kapazität dar. Sein thermischer Widerstand ist im Datenblatt angegeben. Folglich kann mit dem Wärmestrom, der durch das Thermoelement fließt, die Temperaturdifferenz, die über dem Element liegt, berechnet werden.

$$\Delta T_{TEG} = \Phi \cdot R_{th} = \Phi \cdot 1,6 \text{ K/W} \quad (4.2)$$

Aus dieser wiederum berechnet sich mit Formel 4.1 die Leerlaufspannung des Thermogenerators bei Serienschaltung:

$$U_q = \alpha \cdot \Delta T = 0,1055 \text{ V/K} \cdot 1,6 \text{ K/W} \cdot \Phi \quad (4.3)$$

Also beträgt die Leerlaufspannung eines *TEG 100* nur ca. 0,16 V, wenn 1 W Wärmestrom durch ihn fließen. Andererseits würde bei einer konstanten Temperaturdifferenz von nur 5 K bereits 3,125 W Wärmestrom durch das Element fließen.

Es bleibt hier festzuhalten, dass der Thermogenerator ein thermisches R-C-Glied ist. Die Temperaturdifferenz, die über dem thermischen Widerstand abfällt, ist mit der Leerlaufspannung des Generators über den Faktor α gekoppelt.

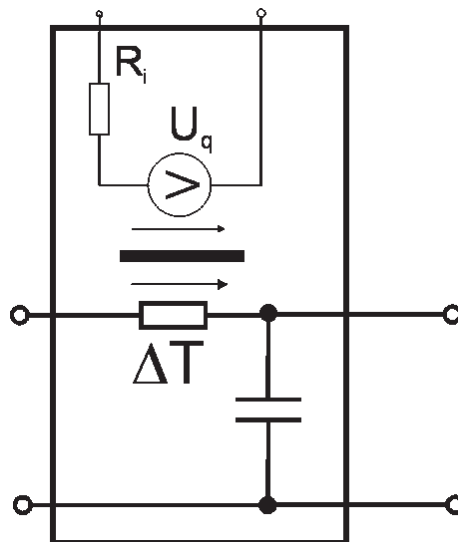


Abbildung 4.5: Ersatzschaltbild eines Thermogenerators

Verwendung mehrerer Thermogeneratoren

Die Verwendung mehrerer Thermogeneratoren kann ohne weiteres in das thermische und elektrische Schaltbild übernommen werden. Werden mehrere Thermogeneratoren auf einer Heizplatte nebeneinander betrieben, so entspricht dies verständlicherweise einer Parallelschaltung. Der thermische Widerstand bei n Elementen sinkt dann auf den n -ten Teil. Damit sinkt auch die Temperaturdifferenz ΔT über den Thermoelementen, wenn die Heizung mit gleicher Leistung betrieben wird. Mit der Temperaturdifferenz verringert sich auch die Leerlaufspannung des Thermogenerators. Durch Seriellschaltung der Thermogeneratoren kann jedoch die Leerlaufspannung auf den gleichen Wert angehoben werden, den ein Generator erreichen würde, wenn er von dem gleichen Wärmestrom durchflossen wird. Letztlich bestimmt der Wärmestrom, der durch ein Thermoelement, also beim *TEG 100* pro 40 mm x 40 mm Fläche, nach außen abgeleitet werden kann, die Leerlaufspannung. Welche Anordnung am besten funktioniert, geben demnach die Anwendung und der Wärmestrom pro Fläche vor.

Die Innenwiderstände eines Thermogenerators addieren sich bei der elektrischen Serienschaltung zu einem Gesamtinnenwiderstand, oder der Gesamtinnenwiderstand verkleinert sich auf den n -ten Teil bei Parallelschaltung von n Elementen.

Leistungsanpassung

Wie aus den Grundlagen der Elektrotechnik bekannt, liegt Leistungsanpassung vor, wenn

$$R_i = R_{Last}$$

gilt.

Durch geschicktes Verschalten der Thermoelemente kann der Innenwiderstand der Thermogeneratoren für eine bestimmte Last dem Verwendungszweck entsprechend optimiert werden.

4.4 Messungen mit den Thermogeneratoren

4.4.1 Messungen mit konstanter Temperaturdifferenz

Um aussagekräftige Messungen durchführen zu können, muss ein geeigneter Messaufbau gefunden werden. Im nächsten Abschnitt ist die gewählte Messanordnung beschrieben. Wie in den theoretischen Betrachtungen gezeigt, muss der Messaufbau entweder auf beiden Seiten der Elemente eine konstante Temperatur

gewährleisten oder einen konstanten Wärmestrom erzeugen. Dazu muss eine Seite beheizt und die andere gekühlt werden bzw. auf Umgebungstemperatur gehalten werden. Schnell ist klar, dass es für die Aufgabenstellung Sinn ergibt, wenn eine Seite auf normale Raum- bzw. Umgebungstemperatur gebracht wird. Die andere Seite soll dann auf die ungefähr zu erwartende Hautoberflächentemperatur zwischen 30 °C und 36 °C gebracht werden.

Das Problem dabei ist jedoch die Schwierigkeit, eine wirklich genaue Temperaturregelung aufzubauen. Hierzu sind auf beiden Seiten der Elemente Kühlkörper mit einem extrem niedrigen thermischen Widerstand nötig. Dies lässt sich zwar realisieren, doch der Aufwand ist relativ hoch. Selbst moderne CPU-Kühler, die zudem recht teuer sind, weisen einen thermischen Widerstand von $R_{th} = 0,24 \text{ K/W}$ bis $0,36 \text{ K/W}$ auf. Zwar ist der auftretende Temperaturabfall über dem Kühlkörper recht gering, aber dennoch vorhanden. Außerdem gilt der angegebene thermische Widerstand nur bei laufendem Lüfter. Dazu sind moderne CPU-Kühler auch noch recht groß, und die Handlichkeit ist stark eingeschränkt.

Ebenfalls auf Grund der hohen Kosten ist die Idee, mit Hilfe einer Wasserkühlung eine konstante Temperaturdifferenz zu erzielen, verworfen worden. Durch die hohe Wärmekapazität des Wassers wäre ein sehr kleiner thermischer Widerstand realisierbar gewesen, aber auch hier wäre ein hoher Aufwand von Nöten gewesen.

Als drittes sei hier noch die Möglichkeit aufgezählt, die Temperatur direkt auf beiden Seiten der Elemente mit einem sehr flachen Messfühler zwischen Thermogenerator und Kühlkörper zu messen. Wenn das gelingt, ist aber noch keine wirksame Temperaturregelung vorhanden, welche zusätzlichen Aufwand erfordern wird.

4.4.2 Messungen mit konstantem Wärmeleistungsstrom

Wegen der genannten Schwierigkeiten muss überlegt werden, ob es nicht sinnvoller ist, mit einem annähernd konstantem Leistungsstrom durch das Thermoelement zu messen und dann mit den Theoriewerten zu vergleichen. Wie sich im Abschnitt 4.5 zeigt, ist eine Messung mit konstantem Leistungsstrom deutlich einfacher zu realisieren. Das Kapitel über theoretische Betrachtungen wirft sowieso die Frage auf, ob nicht besser die tatsächlich mögliche Wärmeleistungsabgabe, die der Mensch an die Umgebung überhaupt abgeben kann, für die Betrachtung zu verwenden ist. Deshalb wird diese Variante gewählt, und die Messungen mit einfachen Mitteln durchgeführt.

4.5 Messaufbau

Um das oben vorgegebene Konzept zu erfüllen, wird eine Heizung benötigt. Diese soll eine konstante Wärmeleistung abgeben und damit den konstanten Leistungsstrom durch die Thermogeneratoren ermöglichen. Wie erwähnt, muss auch auf der warmen Seite der thermische Eingangswiderstand so gering wie möglich gehalten werden. Da die Heizung eine konstante Leistung abgibt, ist also für eine gute thermische Kopplung zwischen Heizung und Thermogeneratoren zu sorgen.

4.5.1 Heizfolie

Bei der vorhandenen Heizung handelt es sich um eine selbstklebende Heizfolie, wie sie bei Außenspiegelheizungen im KFZ eingesetzt wird. Die maximale Wärmeleistung der Folie beträgt 12 Watt. Ihre Abmessungen sind 110 mm x 77 mm. Die Wärmeleistung, welche die Folie abgibt, kann an einem Labornetzteil, an dem die Heizfolie angeschlossen ist, eingestellt werden. Um die tatsächliche elektrische Leistung zu ermitteln, werden Strom und Spannung gemessen. Der Einfachheit halber wird davon ausgegangen, dass die komplette elektrische Leistung in Wärmeleistung umgewandelt wird, also:

$$P_w = P_{el} = U \cdot I$$

4.5.2 Kupferplatte als „Heat-Spreader“

Ein *TEG 100* hat die Abmessung 40 mm x 40 mm. Es sind 5 Thermogeneratoren vorhanden. Schnell wird klar, dass das direkte Aufkleben der Folie auf die Elemente nicht möglich ist, weil gleichzeitig auch noch dafür gesorgt werden müsste, dass die komplette Wärmeleistung der Heizfolie durch die Thermogeneratoren fließt. Außerdem sind die Heizschleifen, also die Leiterbahnen, nicht homogen auf der Folie verteilt. Die Lösung dieses Problems ist der Einsatz einer Kupferplatte von 1 mm Dicke als „Heat-Spreader“. Kupfer wird auch bei CPU-Kühlern wegen seiner hervorragenden Wärmeleitfähigkeit zum schnellen Ableiten und Verteilen des Leistungsstroms eingesetzt. Die Kühler bestehen nicht komplett aus Kupfer, weil Kosten und Gewicht ansonsten zu hoch wären. Vielmehr verteilt eine kleine Kupferplatte die Wärme schnell und gibt sie auf einer nun größeren Fläche an den mit ihr verlöteten Aluminiumkühlkörper weiter. So ist es möglich, kostengünstig und gewichtssparend die Spitzenleistung von bis zu über 100 Watt einer modernen CPU mit der Die-Größe von ca. 1 cm² abzuleiten.

Dieses Prinzip soll auch hier eingesetzt werden. Die 120 mm x 120 mm x 1 mm

Kupferplatte verteilt die komplette Wärmeleistung der Heizfolie, welche auf die Unterseite der Kupferplatte geklebt wird. Die Thermogeneratoren werden dünn mit Wärmeleitpaste bestrichen und auf die Oberseite platziert.

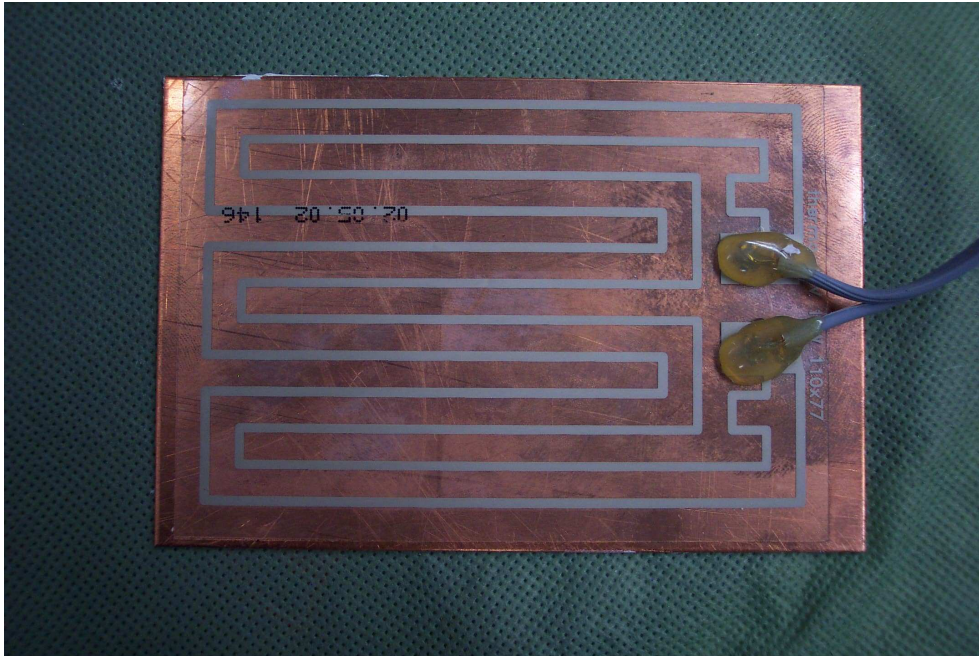


Abbildung 4.6: Die Kupferplatte mit aufgeklebter Heizfolie

Zusätzlich muss die Kupferplatte nach unten isoliert werden, damit zumindest annähernd davon ausgegangen werden kann, dass der gesamte Wärmeleistungsstrom nach oben durch die Thermogeneratoren fließt. Dies kann mit herkömmlichem Styropor einfach bewerkstelligt werden. Für die Zuleitung ist ein kleiner Hohlraum ausgeschnitten.

4.5.3 Kühlkörper

Die Thermogeneratoren müssen die Wärme nach oben ableiten können. Um den thermischen Widerstand gering zu halten, müssen Kühlkörper eingesetzt werden. Für die Messungen sollten passive Kühler verwendet werden. Auch die Abmessung sollten sich in einer Größenordnung bewegen, welche dem späteren praktischen Einsatz nicht im Wege steht. Es wurden handelsübliche Fingerkühlkörper aus eloxiertem Aluminium verwendet. Nach Angabe des Herstellers besitzt ein Kühlkörper den thermischen Widerstand von $R_{th} = 4,8 \text{ K/W}$. Diese Angabe ist notwendig, um Vergleichsrechnungen mit der Theorie durchzuführen.

Um auch hier die thermische Kopplung zu verbessern, werden die Kühlkörper mit Wärmeleitpaste dünn bestrichen. Bei den Messungen werden die Kühlkörper

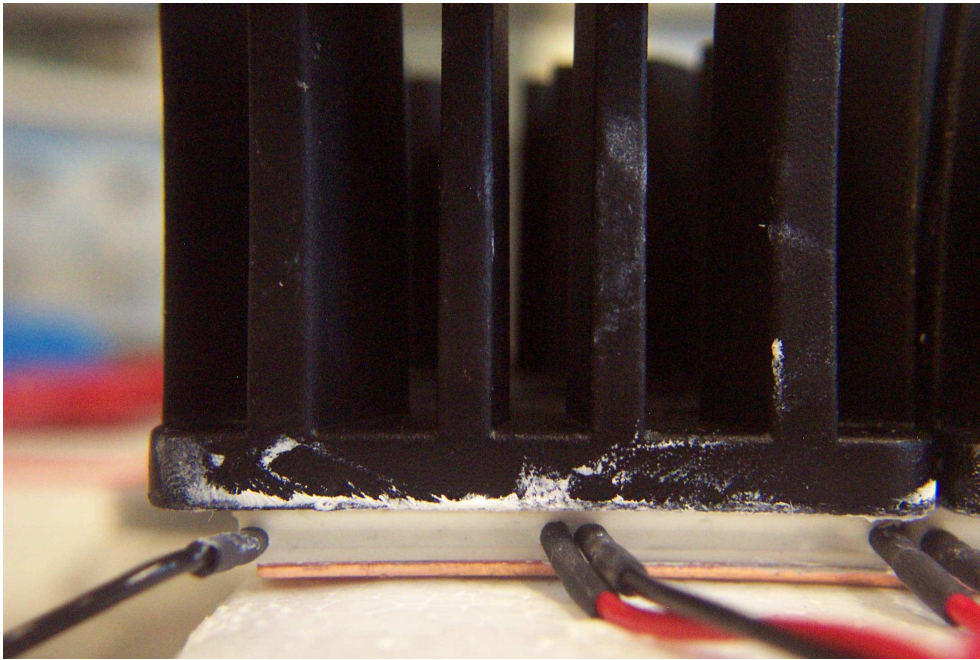


Abbildung 4.7: *TEG 100* zwischen Kupferplatte und Kühlkörper

zusätzlich beschwert, jedoch so, dass die Wärmeabfuhr nicht beeinträchtigt wird.

4.5.4 Messgeräte

Um die geplanten Messungen durchzuführen, genügen zwei bis drei Multimeter. Zusätzlich steht ein digitales Oszilloskop bereit. Die aufgezeichneten Signalverläufe lassen sich mit einem PC auslesen. Mit dem Oszilloskop sind auch Langzeitmessungen und die Aufzeichnung von Spannungswerten über mehrere Stunden möglich. Dies wird bei der Untersuchung der Ladekurve und der Ladedauer ausgiebig genutzt.

Mit einem Labornetzteil kann die Heizfolie mit fest eingestellten Spannungs- oder Stromwerten betrieben werden. Hieraus lässt sich dann auch die Leistung berechnen. Volt- und Amperemeter sind im Netzteil integriert. Der Anschluss der Geräte erfolgt über gewöhnliche Messklemmen oder Messspitzen. Das Oszilloskop besitzt einen Tastkopf.

Weiter stehen drei digitale Thermometer zu Verfügung, mit denen die Lufttemperatur, die Temperatur der Kupferplatte und der Fingerkühlkörper gemessen werden können.

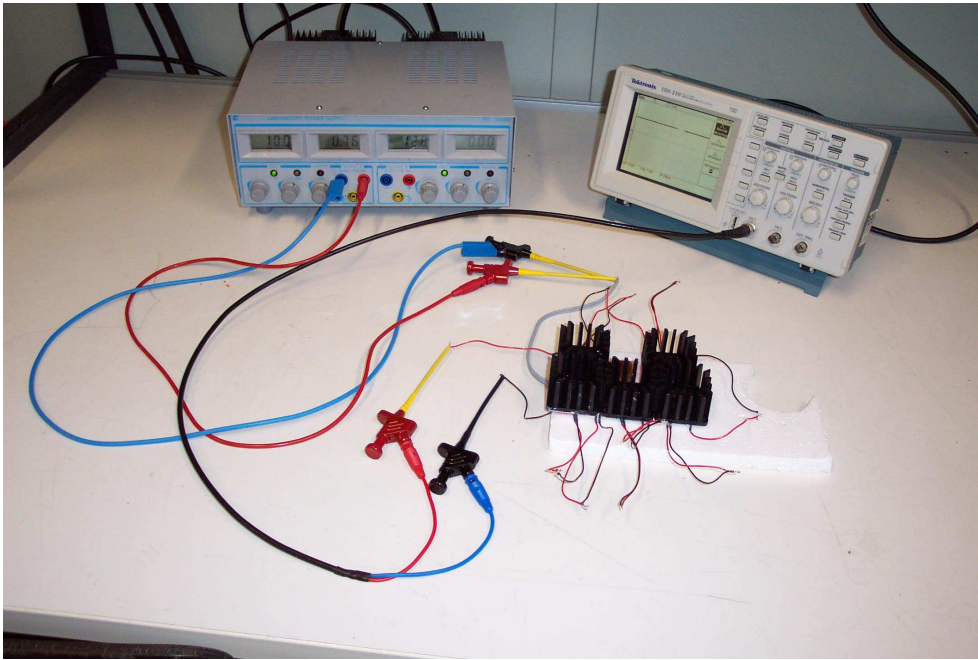


Abbildung 4.8: Messaufbau ohne Ladeschaltung

4.6 Erprobung des Messaufbaus und Vergleichsrechnung mit der Theorie

4.6.1 Temperaturmessungen

Für den eventuellen Betrieb mit Körperwärme ist natürlich interessant, welche Temperatur die Kupferplatte im stationären Zustand erreicht. Des Weiteren wird noch die Umgebungstemperatur gemessen. Sie liegt bei allen Messungen um 21,8 °C. Kleine Schwankungen dieses Wertes werden nicht berücksichtigt, da sie so auch unter realen Bedingungen vorkommen. Es soll in drei Heizstufen gemessen werden. Zur Vereinfachung wird jeweils am Labornetzteil eine feste Spannung (6 V, 10 V und 12 V) eingestellt, der Strom bestimmt und die Leistung anschließend berechnet. Es ergeben sich drei Heizleistungsstufen von 2,7 W, 7,3 W und 10,8 W. Um die Kupfertemperatur unter den Thermogeneratoren zu messen, wird von der Unterseite der Kupferplatte gemessen. Folgende Kupfertemperaturen konnten gemessen werden:

1 TEG bei 21,8 °C Umgebungstemperatur		
Spannung Netzteil	Heizleistung Φ	Temperatur Kupfer
6 V	2,7 W	31,8 °C
5 TEG bei 21,8 °C Umgebungstemperatur		
Spannung Netzteil	Heizleistung Φ	Temperatur Kupfer
6 V	2,7 W	28,0 °C
10 V	7,3 W	34,8 °C
12 V	10,8 W	38,0 °C

Tabelle 4.4: Messungen der Kupfertemperaturen

4.6.2 Spannungsmessungen

Mit den Erkenntnissen aus dem theoretischen Teil und aus dem oben beschriebenen Messaufbau lässt sich das thermische Schaltbild der Anordnung erstellen. Die Messungen werden mit einem oder fünf Elementen durchgeführt. Es wird noch ein Abwärmestrom, welcher nicht durch die Elemente fließt, z. B. über die Kupferplatte und über die Styropor-Isolierung berücksichtigt. Damit ergibt sich folgendes Schaltbild:

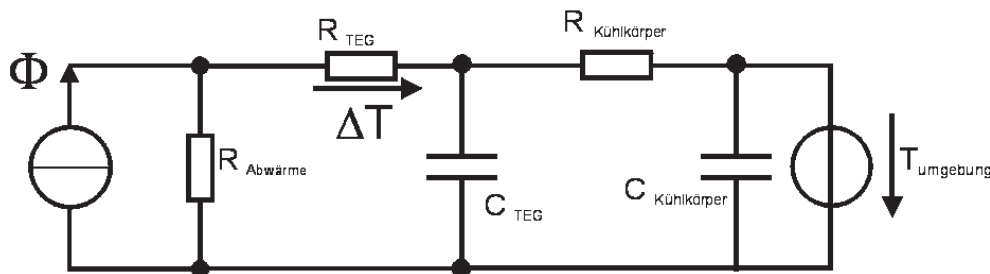


Abbildung 4.9: Das thermische Schaltbild der Versuchsanordnung

Angenommen der Abwärmestrom sei nun vernachlässigbar gering, so würde der gesamte Wärmestrom durch die Anordnung und auch die Thermogeneratoren fließen. Der thermische Gesamtwiderstand berechnet sich zu

$$R_{th_{TEG}} = 1,6 \text{ K/W} \quad (4.4)$$

bzw. bei Verwendung von 5 Thermogeneratoren in thermischer Parallelschaltung:

$$R_{th_{TEG}} = 1,6 \text{ K/W} \cdot \frac{1}{5} = 0,32 \text{ K/W} \quad (4.5)$$

Nun wird davon ausgegangen, dass nach kurzer Zeit sich eine stationäre Wärmeströmung einstellt und alle Kapazitäten einfach durch Leerlauf ersetzt werden können. Die Temperaturdifferenz über dem Thermoelement beträgt dann:

$$\Delta T = \Phi \cdot R_{th_{TEG}} \quad (4.6)$$

Die Heizung soll mit verschiedenen Heizleistungen betrieben werden

$$\Delta T_1 = 2,7 \text{ W} \cdot 1,6 \text{ K/W} = 4,32 \text{ K} \quad (4.7)$$

und für die 5 Thermogeneratoren in thermischer Parallelschaltung:

$$\Delta T_{5_1} = 2,7 \text{ W} \cdot 0,32 \text{ K/W} = 0,864 \text{ K} \quad (4.8)$$

$$\Delta T_{5_2} = 7,3 \text{ W} \cdot 0,32 \text{ K/W} = 2,336 \text{ K} \quad (4.9)$$

Daraus ergibt sich wieder die Leerlaufspannung bei elektrischer Serienschaltung aller 5 Elemente:

$$U_{5_{q1}} = 5 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 5 \cdot 0,1055 \text{ V/K} \cdot 0,864 \text{ K} = 0,456 \text{ V} \quad (4.10)$$

$$U_{5_{q2}} = 5 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 5 \cdot 0,1055 \text{ V/K} \cdot 2,336 \text{ K} = 1,23 \text{ V} \quad (4.11)$$

Zum Vergleich bieten sich die Messdaten an.

1 TEG el. seriell		
Heizleistung Φ	Spannung $U_{q_{theo}}$	Messwert $U_{q_{Mess}}$
2,7 W	0,456 V	0,221 V
5 TEG el. seriell/th. parallel		
Heizleistung Φ	Spannung $U_{q_{theo}}$	Messwert $U_{q_{Mess}}$
2,7 W	0,456 V	0,357 V
7,3 W	1,23 V	0,95 V

Tabelle 4.5: Messungen der Leerlaufspannung

Aus den oben genannten Werten ist ersichtlich, dass die Abwärme den tatsächlichen Wärmestrom durch die Thermogeneratoren verringert. Außerdem tragen die Übergangswiderstände zwischen Kupferplatte und Element sowie Element und Kühlkörper dazu bei, dass sich der Abwärmestrom nach außen vergrößert. Aus den Messdaten lässt sich der thermische Widerstand gegen Masse berechnen. Wenn die Kupferplatte mit nur einem Element bedeckt ist, wird

der Abwärmestrom nach außen größer. Der Messwert weicht stärker von dem Theoriewert ab. Hier soll die Berechnung des Abwärmestroms für den Fall von 5 verwendeten Elementen vorgeführt werden:

$$\Phi_{Abwaerme} = \Phi - \Phi_{TEG} = \Phi - \frac{U_{qMess}}{R_{th_{TEG}} \cdot \alpha} \quad (4.12)$$

$$\Phi_{Abwaerme} = 7,3 \text{ W} - \frac{0,95 \text{ V}}{1,6 \text{ K/W} \cdot 0,1055 \text{ V/K}} \quad (4.13)$$

$$\Phi_{Abwaerme} = 7,3 \text{ W} - 5,63 \text{ W} = 1,67 \text{ W} \quad (4.14)$$

Der Abwärmewiderstand gegen Masse wird am einfachsten über die thermischen Leitwerte und mit der Stromteilerregel berechnet. Zahlenwerte sollen hier aber nicht berechnet werden.

$$\Phi_{Abwaerme} = \Phi \cdot \frac{G_{th_{Ab}}}{G_{th_{Ab}} + G_{th_{Anordnung}}} \quad (4.15)$$

$$G_{th_{Ab}} = \frac{G_{th_{Anordnung}}}{\frac{\Phi}{\Phi_{Abwaerme}} - 1} \quad (4.16)$$

Anschließend soll noch untersucht werden, wie lange es dauert, bis sich ein stationärer Zustand einstellt, damit bei den Messungen später die Kapazitäten vernachlässigt werden können. Dazu wird mit dem Oszilloskop die Spannung der Thermogeneratoren nach dem Einschalten der Heizung einige Minuten lang aufgenommen. Der Versuch wird wieder mit einem und mit 5 Thermogeneratoren durchgeführt. Im zeitlichen Verlauf ist zu erkennen, dass es ungefähr 3 Minuten dauert, bis sich die stationäre Wärmeströmung einstellt.

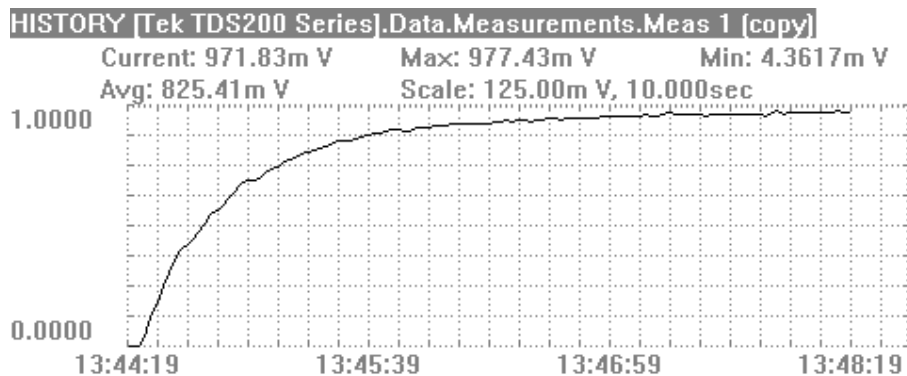


Abbildung 4.10: Spannungsverlauf beim Einschalten der Heizung

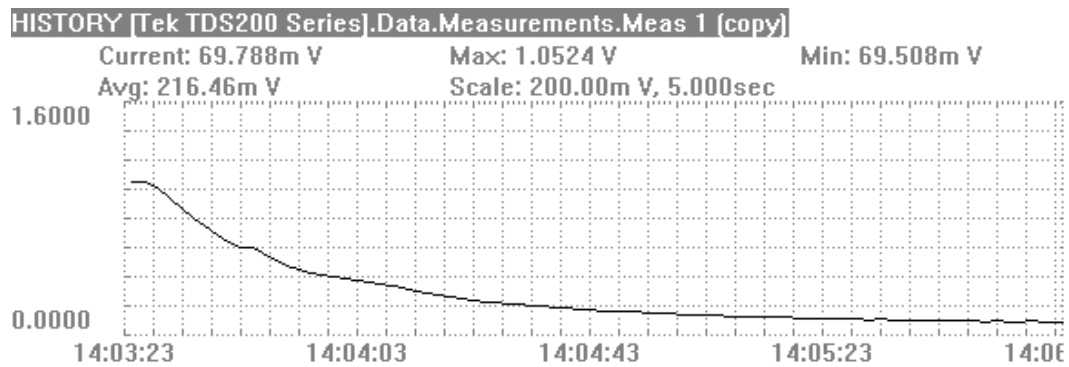


Abbildung 4.11: Spannungsverlauf beim Ausschalten der Heizung

Auch beim Ausschalten gibt es eine Verzögerung, wie in Bild 4.11 gezeigt.

Damit wäre das Verhalten der Thermogeneratoren hinreichend untersucht. In Kapitel 5 soll nun nach Entwicklung einer Ladeschaltung ein Energiespeicher mit Hilfe der Thermogeneratoren geladen werden.

5 Entwicklung einer Schaltung zur Spannungsversorgung

5.1 Anforderungen an die Spannungsversorgung eines mobilen Verbrauchers

Die Spannungsversorgung soll es ermöglichen, einen *MICA*-Knoten mindestens so lange zu betreiben, dass eine gewisse Anzahl von Datenpaketen erfolgreich versandt werden kann. Der Energiespeicher muss auf eine vorher festgelegte Betriebsspannung geladen werden können. Laut Datenblatt arbeiten *MICA*-Knoten in einem Bereich von 3,3 V - 2,7 V. Experimentell konnte jedoch festgestellt werden, dass je nach Leistungsbedarf der Knoten auch noch deutlich länger mit Spannungen bis ca. 2 V funktioniert.

5.2 Konzeptionelle Überlegungen

Die Spannungsversorgung muss also den Energiespeicher bis auf den Sollwert von 3,3 V laden. Eine Elektronik hat somit die Aufgabe, den Energiespeicher trotz der niedrigen Eingangsspannung im Bereich von 0,7 bis 1,5 V aufzuladen. Um dies zu verwirklichen, wird ein „Step-up“ DC-DC Konverter benötigt. Er soll effizient und ohne größere Energieverluste die Spannung auf den Sollwert 3,3 V anheben können. Auf dem Markt sind etliche Gleichspannungskonverter zu haben. Die Auswahl reduziert sich wegen der niedrigen Eingangsspannung, mit der dieser DC-DC Konverter laufen muss. Erhältlich sind hier ICs, die vor allem für den Betrieb von elektronischen Geräten mit nur einer Batteriezelle gedacht sind.

Der gewählte Baustein *MAX1676* von *MAXIM* ist in SMD-Bauform verfügbar, was äußerst platzsparende Schaltungen ermöglicht. Entscheidend für die Auswahl waren die niedrige Anlaufspannung sowie die hohe Effizienz, die dieser Baustein bietet.

5.3 Technische Einzelheiten des MAXIM 1676

5.3.1 Beschreibung und Pinbelegung

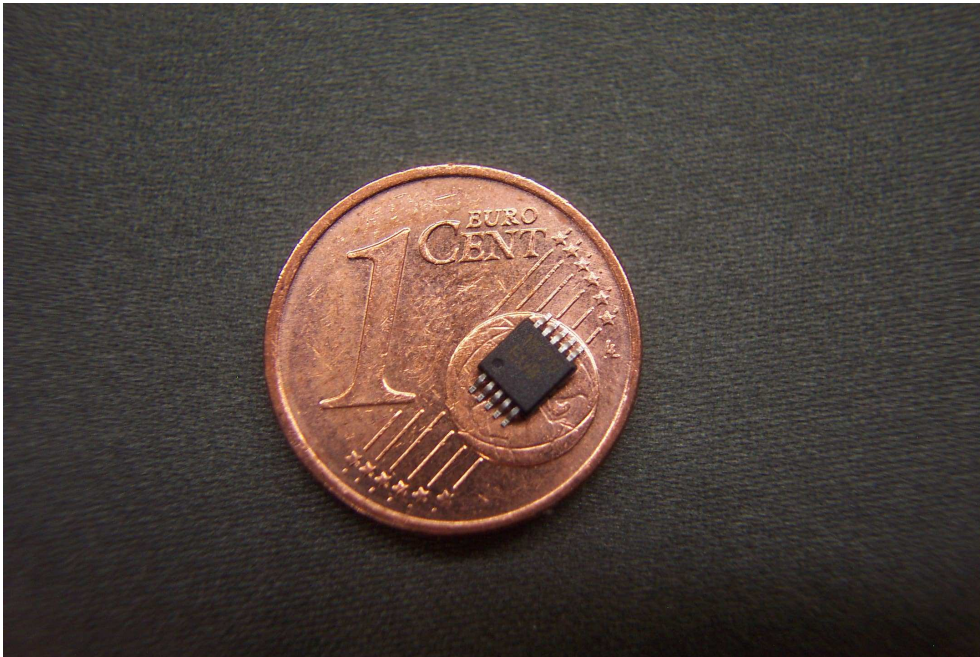
In diesem Abschnitt soll zunächst eine Auflistung der relevanten Eigenschaften des *MAXIM 1676* gegeben werden. Der *MAXIM 1676* ist ein hocheffizienter Step-Up DC-DC Konverter, der im sogenannten μ Max-Gehäuse verfügbar ist. Es hat 10 Pins, die wie folgt belegt sind:

PIN	Name	Funktion
1	FB	Feedbackeingang zur Einstellung der Ausgangsspannung
2	LB1	Eingang zur Low-Battery-Erkennung
3	LBO	Ausgang des Low-Battery-Signals
4	CLSEL	Current-Limit-Select zur Begrenzung des Ausgangsstroms auf 0,5 A oder 1 A
5	REF	Referenzspannung von 1,3 V. Wird über einen 0,1 μ F Kondensator mit Masse verbunden
6	SHDN	Shut-Down Eingang. Schaltet MAX1676 in den Shut-Down-Modus, wenn der Eingang auf GND liegt.
7	BATT	Damping-Switch. Hiermit können Überschwinger am LX-Eingang bei hohen Ausgangsströmen bedämpft werden.
8	GND	Masse
9	LX	Eingang (Drain für Leistungs-MOSFETs)
10	OUT	Ausgang

Tabelle 5.1: Pinbelegung des DC-DC Konverters

Die folgende kurze Auflistung fasst die wichtigsten Eigenschaften zusammen:

- Effizienz von bis zu 94 %
- Garantierte Anlaufspannung von 1,1 V
- Eingangsspannung von nur 0,7 V oder höher
- niedriger Eingangsruhestrom von 16 μ A

Abbildung 5.1: Der MAXIM 1676 im μ Max-Gehäuse im Größenvergleich

5.3.2 Funktionsweise von DC-DC Konvertern

Wie ein induktionsbasierter Step-Up-Konverter prinzipiell funktioniert, wird nun im Folgenden beschrieben.

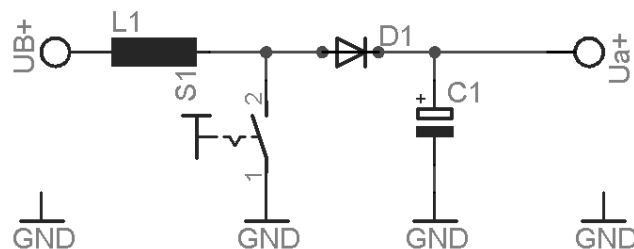


Abbildung 5.2: Ladephase des Kondensators

Über eine Induktivität wird ein Kondensator am Ausgang der Schaltung geladen (siehe 5.2). Eine Diode trennt hierbei den Kondensator vom Eingang ab und verhindert das Zurückfließen von Ladung. War der Schalter lange genug offen, so befindet sich auf dem Kondensator die Eingangsspannung:

$$u_C = u_{Ein} = u_{Aus}$$

Außerdem gilt bei idealer Diode die Maschengleichung:

$$u_{Ein} = u_L + u_{Aus} \Leftrightarrow u_{Ein} - u_L = u_{Aus} \quad (5.1)$$

Wird nun der Schalter geschlossen, steigt der Strom an der Induktivität bei einem idealem Spulenwiderstand von $0 \, \Omega$ linear an (Bild 5.3):

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_L}{L} \quad (5.2)$$

Wenn der Schalter erneut umgelegt wird, treibt die Induktivität den Strom weiter. Diesmal sinkt der Stromverlauf linear. Es gilt

$$\frac{di}{dt} = \frac{-u_L}{L} \quad (5.3)$$

und die Spannung $u_C = u_{Aus}$ steigt mit jedem Zyklus an.

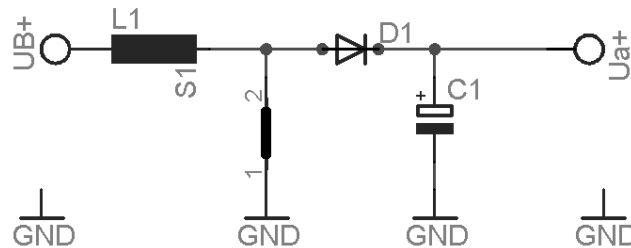


Abbildung 5.3: Ladephase der Induktivität

Beim *MAXIM 1676* wird diese Ausgangsspannung durch eine Rückkopplung und Steuerlogik auf dem gewünschten Wert gehalten. Der DC-DC Konverter *MAXIM 1676* enthält einen Stromrichter, welcher über einen niederohmigen $0.3 \, \Omega$ N-Kanal Leistungs-MOSFET verfügt. Durch den kleinen Widerstand gelingt es, die Verluste gering zu halten. Gesteuert durch eine Kombination aus Puls-Weiten-Modulation und Puls-Frequenz-Modulation erreicht der *MAXIM 1676* seine hohe Effizienz. Das Pulssignal wird ohne Oszillator, sondern mit Hilfe von Logikgattern moduliert. Mehrere Komparatoren setzen dabei Schaltschwellen für den Spulenstrom und den Feedback-Eingang. Über den Feedback-Eingang wird Ausgangsspannung rückgekoppelt und nimmt Einfluss auf die Modulation. Das Blockschaltbild im Anhang dieser Arbeit zeigt das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des *MAXIM 1676*.

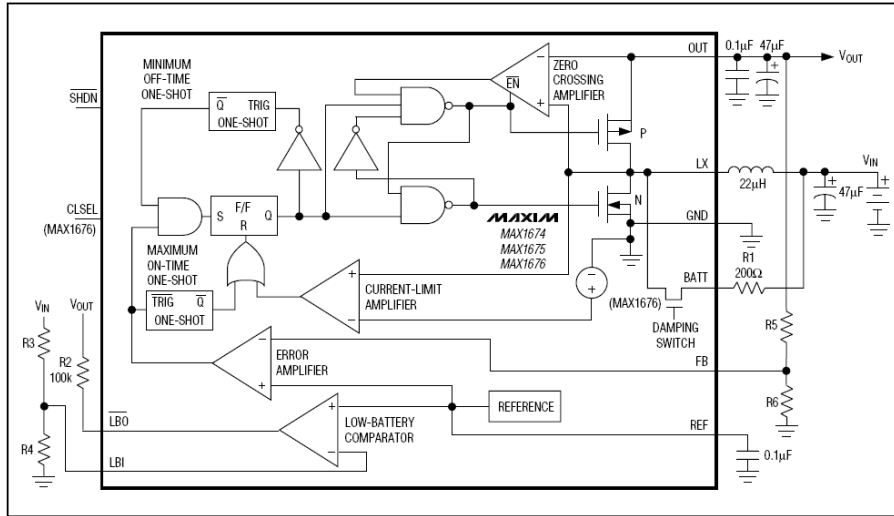


Abbildung 5.4: Vereinfachtes Blockschaltbild des MAX 1676 (Quelle: Datenblatt Maxim)

5.4 Beschaltung des MAXIM 1676 und Schaltungsvarianten

5.4.1 Grundsaltung

Zur Beschaltung des MAXIM 1676 werden nur wenige Bauteile benötigt. Als wichtigstes Bauteil kann dabei die Induktivität gelten. Als energiespeicherndes Element ist sie maßgeblich für Strombelastbarkeit des Ausgangs am DC-DC-Konverter verantwortlich. Laut Datenblatt sind hier Induktivitäten im Bereich von 10 μH bis 47 μH erlaubt. Über die Formel

$$I_{out_{max}} = \frac{u_{Ein}}{u_{Aus}} \cdot \left[I_{Limit} - t_{off} \cdot \left(\frac{u_{Aus} - u_{Ein}}{2 \cdot L} \right) \right] \cdot \eta$$

läßt sich der maximale Ausgangsstrom berechnen. Dabei ist:

$I_{Limit} = 0.5 \text{ A}$ oder 1 A (einstellbar am CLSEL-Eingang)

$t_{off} = 0.75 \mu\text{s} - 1,25 \mu\text{s}$ (Ausschaltzeit am LX Eingang)

$\eta = 0,9$ (Effizienz).

Weiterhin beeinflusst der Gleichstromwiderstand der Induktivität maßgeblich die Effizienz der Schaltung. Hier soll kein Wert für L genau berechnet werden. Auf Grund der angesprochenen Einflüsse ist es klar, dass die Messungen mit verschiedenen Induktivitäten durchgeführt werden.

Die Beschaltung des *MAXIM 1676* benötigt jetzt nur noch einen Kondensator am Eingang und Ausgang des DC-DC Konverters. Empfohlen sind hier Elektrolytkondensatoren im Bereich von $47\ \mu\text{F}$. Tantalkondensatoren bieten den Vorteil, nur geringe Leckströme zu haben, weshalb die Messungen mit solchen Kondensatoren durchgeführt worden sind. Hier soll schließlich der Ausgangskondensator durch den Speicherkondensator (*Goldcap*) ersetzt und der Einfluss verschiedener Kondensatoren am Eingang auf die Ladezeit untersucht werden.

Zuletzt muss nur noch der REF-Pin über einen $0,1\ \mu\text{F}$ Kondensator (z. B. Keramik) mit Masse verbunden werden.

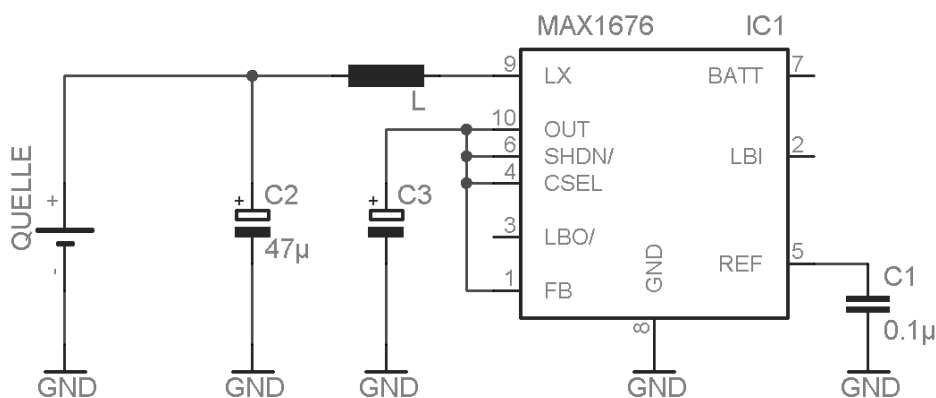


Abbildung 5.5: Grundsaltung für 3,3 V Ausgangsspannung

5.4.2 Verringern der Anlaufspannung mit einer Schottky-Diode

Die Beschaltung mit einer externen Schottky-Diode zwischen dem LX-Eingang und dem Ausgang wird im Datenblatt bei geringen Eingangsspannungen empfohlen. Da bei den Messungen in dieser Arbeit die Schaltung mit Eingangsspannungen nahe der Schwelle, bei welcher der *MAXIM 1676* anläuft, zuverlässig funktionieren sollte, ist das tatsächliche Verhalten untersucht worden.

Mit Hilfe einer Schottky-Diode kann die Anlaufspannung des *MAXIM 1676* um ca. $0,2\ \text{V}$ verringert werden (Abbildung 5.6). Falls der DC-DC Konverter inaktiv ist, liegt die Ausgangsspannung u_{Aus} normal deutlich unter dem Niveau von u_{Ein} . Die Diode lässt, bei höherer Eingangsspannung u_{Ein} als Ausgangsspannung u_{Aus} , einen Stromfluss vom Eingang zum Ausgang zu. Der Energiespeicher wird also auf $u_{Ein} - u_{Schottky}$ aufgeladen. Wenn u_{Aus} in der Nähe von u_{Ein} liegt (ca. $0,7$ - $0,9\ \text{V}$ Leerlaufspannung am Eingang) springt der *MAXIM 1676* problemlos an. Eine Schottky-Diode ist wegen der geringen Durchlassspannung $u_{Schottky} \approx 0,2\ \text{V}$ optimal. Die tatsächliche Effizienz des DC-DC Konverters kann durch den Einsatz

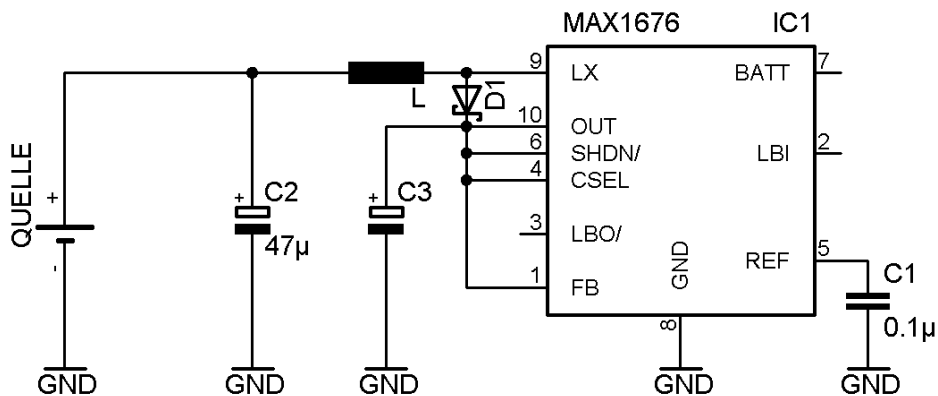


Abbildung 5.6: Schaltung mit Schottky-Diode

der Schottky-Diode aber nicht gesteigert werden.

5.4.3 Erhöhen der Solla Ausgangsspannung und Einfügen einer zusätzlichen Diode am Ausgang

Da die Ladezeit des Speicherkondensators als Ergebnis im Vordergrund steht, wird bei verschiedenen Messungen die Solla Ausgangsspannung auf bis zu 5 V erhöht und geprüft, ob die Ladezeit so verkürzt werden kann. Dabei kann auch gezeigt werden, ob das Abtrennen des Speicherkondensators mit einer weiteren Diode am Ausgang Vorteile für eine kürzere Ladezeit bringt. Die Solla Ausgangsspannung kann am FB Eingang mit einem Spannungsteiler oder einem Potentiometer eingestellt werden (siehe Bild 5.7).

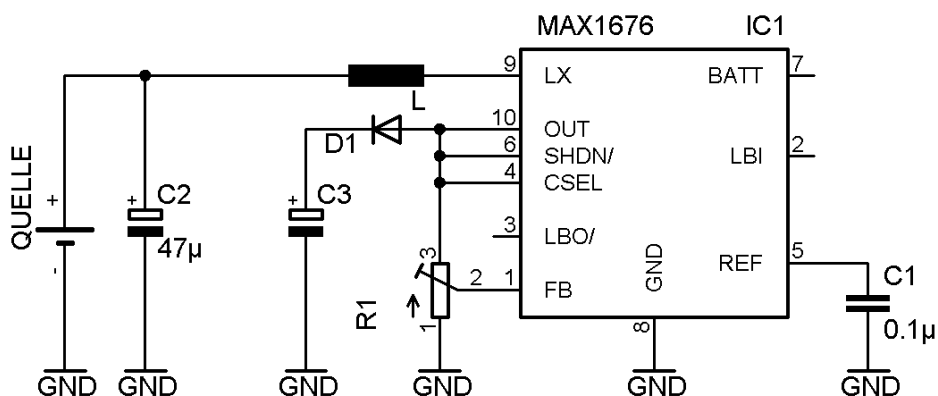
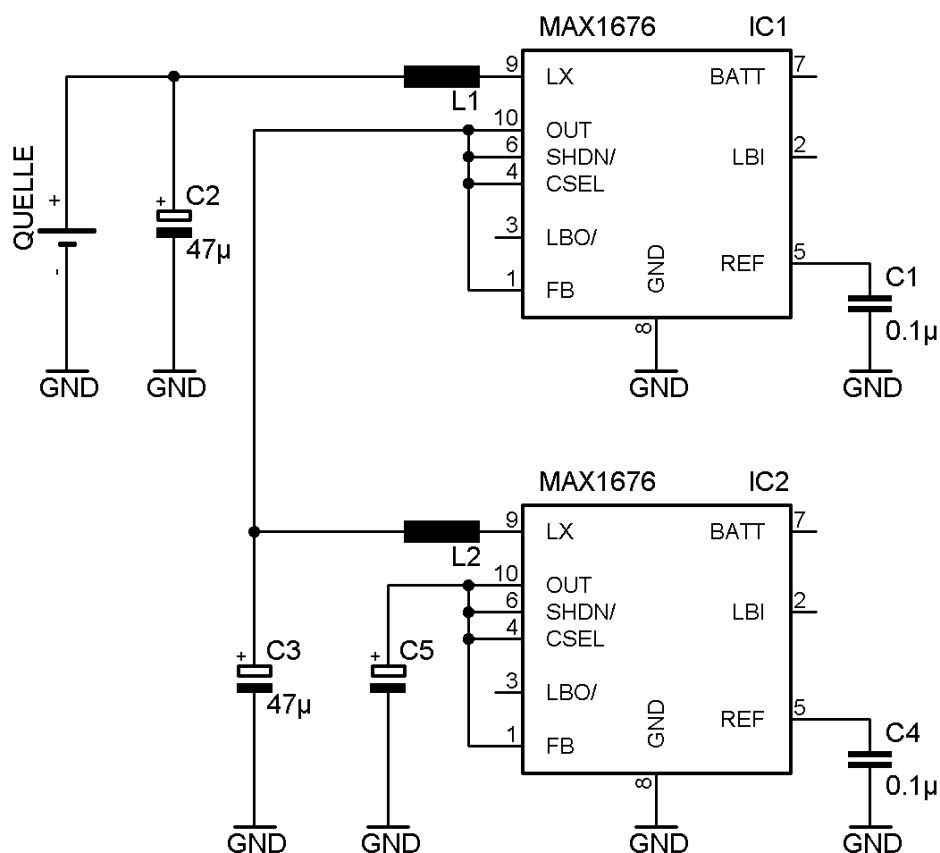


Abbildung 5.7: Schaltung mit Ausgangsdiode und Spannungsteiler am FB-Eingang

5.4.4 Kaskadieren zweier DC-DC Konverter

Weil der Speicherkondensator am Ausgang eine sehr hohe Strombelastung darstellt und die gesamte Schaltung somit eine große Last ist, scheint die Idee, eine Kaskade (siehe Abbildung 5.8) aus mehreren MAX1676 zu bilden, es wert zu sein, untersucht zu werden. Der Ausgang des ersten *MAX 1676* stellt dann den Eingang der zweiten Stufe dar. So könnte es auf diese Weise möglich sein, die nötige Eingangsspannung der zweiten Stufe, zyklisch wiederholt, zu erreichen und den Betrieb zuverlässig aufrecht zu erhalten. Auch hier soll die Ladezeit mit anderen Schaltungsvarianten verglichen werden.

Abbildung 5.8: Kaskadenschaltung mit zwei *MAXIM 1676*

5.4.5 Begrenzen des Ausgangsstromes

Am *MAX 1676* kann der Ausgangsstrom auf 1 A oder 0,5 A begrenzt werden. Hier soll geprüft werden, ob eine Begrenzung des Stromes Vorteile in Bezug auf Anlaufspannung, Ladezeit oder Strombelastung der Thermogeneratoren bringt.

Der CLSET Pin des *MAX 1676* muss für 0,5 A Strombegrenzung auf GND gelegt werden (siehe Abbildung 5.9).

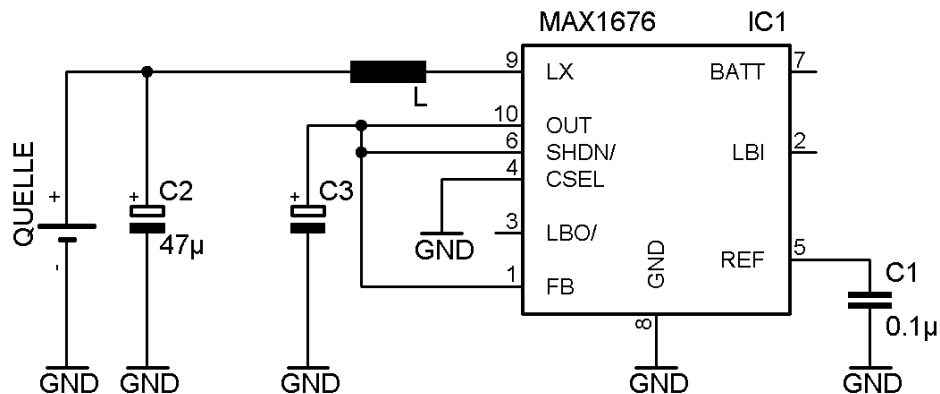


Abbildung 5.9: Strombegrenzung auf 0,5 A

5.5 Beschreibung des Energiespeichers

Der Energiespeicher hat die Aufgabe, zumindest für eine bestimmte Zeit einen mobilen Verbraucher, wie z. B. einen *MICA*-Netzwerkknoten, der nur einen sehr geringen Energieverbrauch im Standby-Modus hat, zu betreiben. Nach Abwägen der Vor- und Nachteile der in Kapitel 3 vorgestellten Energiespeicher, ist ein Speicherkondensator ausgewählt worden. Wegen der Aufgabenstellung, einen Netzwerkknoten für kurze Zeit aus dem Standby-Modus zu wecken und eine gewisse Anzahl von Netzwerkpaketen zu versenden oder zu empfangen, erweist sich zum Experimentieren ein Speicherkondensator durchaus als geeignet. Zu dem Nachteil, dass er nur sehr begrenzt Energie aufnehmen kann, gesellt sich aber eine Reihe von Vorteilen eines Kondensators gegenüber einem Akkumulator:

- einfaches Laden ohne komplizierte Ladeschaltung
- keine Energieverluste durch Ladeschaltung
- wenig Energieverluste durch den Ladevorgang im Kondensator selbst
- keine Akkupflege oder Akkumanagement notwendig
- niedriger Innenwiderstand
- Zyklenfestigkeit und keine Probleme durch ständiges Auf- und Entladen
- überschaubare Ladezeit durch begrenzte Kapazität

Problematisch ist jedoch der linearere Spannungsabfall bei Energieentnahme (siehe 3.3). Dadurch wird der Arbeitsbereich auf eine Spanne von ungefähr 3,3 V bis 2 V eingeschränkt. Die Energie, um den Kondensator auf 2 V zu laden, muss dennoch zunächst aufgewendet werden. Hier ist die Kapazität von 1 F gewählt worden, wodurch der Spannungsaufbau am Kondensator nicht zu lange dauert. Die maximale Spannung beträgt 5,5 V und ist damit ausreichend.

Die Entscheidung für den Speicherkondensator soll keinesfalls als endgültig aufgefasst werden. Ob ein Akkumulator mehr Vorteile bietet, entscheidet dann die Anwendung.

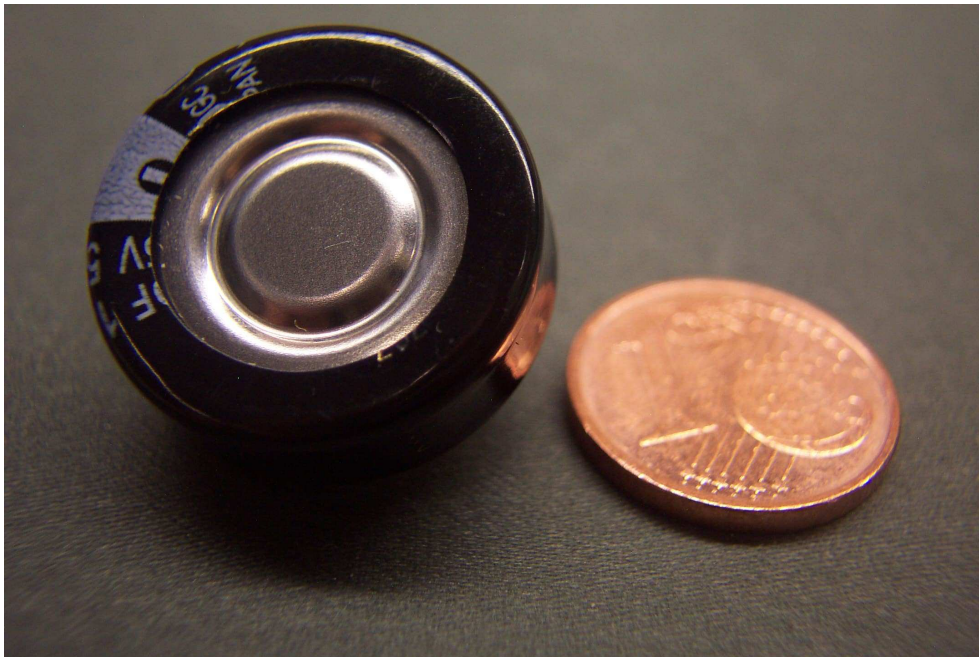


Abbildung 5.10: Speicherkondensator mit einer Kapazität von 1 F

5.6 Testen der Schaltungsvarianten

5.6.1 Grundsaltung

Zunächst soll geprüft werden, ob der *MAX 1676* das im Datenblatt versprochene Verhalten aufweist. Die Grundsaltung aus Bild 5.5 wird aufgebaut. Hierfür werden Bauteile mit den im Datenblatt vorgeschlagenen Werten wie in Tabelle 5.2 verwendet.

Getestet wird die Schaltung dann mit einer annähernd idealen Spannungsquelle, einer Batterie und mit den Thermogeneratoren, die mit 7,3 W beheizt werden. Mit

Bauteil	Wert
C1	0,1 μF
C2	47 μF
C3	47 μF
L	22 μH

Tabelle 5.2: Bauteile der Grundschialtung

allen Quellen erreicht die Ausgangsspannung die geforderten 3,3 V problemlos.

5.6.2 Ladezeitmessung mit der Grundschialtung

Schließlich wird der Energiespeicher an den Ausgang des *MAX 1676* angeschlossen. Der Kondensator C3 wird durch den Speicherkondensator ersetzt. Seine Kapazität beträgt 1 F. Am Ende dieses Kapitels werden dabei alle Ladezeiten, die mit den verschiedenen Quellen und Schaltungen gemessen wurden, zur besseren Übersicht nochmals in einer Tabelle (5.9) zusammengefasst.

Bauteil	Wert
C1	0,1 μF
C2	47 μF
C3	1 F
L	22 μH

Tabelle 5.3: Bauteile der Grundschialtung zum Laden des Speicherkondensators

Zum späteren Vergleich mit den Thermogeneratoren soll zuerst die Ladezeit mit einem Labornetzteil (annähernd ideale Spannungsquelle) und einer 1,5 V Batterie gemessen werden. Die dargestellten Verläufe zeigen, ob und wie schnell die geforderte Ausgangsspannung erreicht wird. Sie wird anfänglich sogar überschritten, sinkt danach auf den Sollwert (siehe Diagramm 5.11).

Der Verlauf beim Laden mit einer handelsüblichen 1,5 V Alkaline-Batterie zeigt, dass das Laden deutlich länger dauert (Der zeitliche Maßstab ist zu beachten!). Offenbar spielt der Innenwiderstand der Spannungsquelle hier eine übergeordnete Rolle und wirkt sich sehr stark auf die Ladezeit aus.

Nun soll der Vergleich mit den beheizten Thermogeneratoren erfolgen. Wegen des höheren Innenwiderstandes ist auch hier eine Verlängerung der Ladezeit zu erwarten. Zunächst wird die Heizleistung $\Phi = 7,3 \text{ W}$ gewählt. Diagramm 5.13

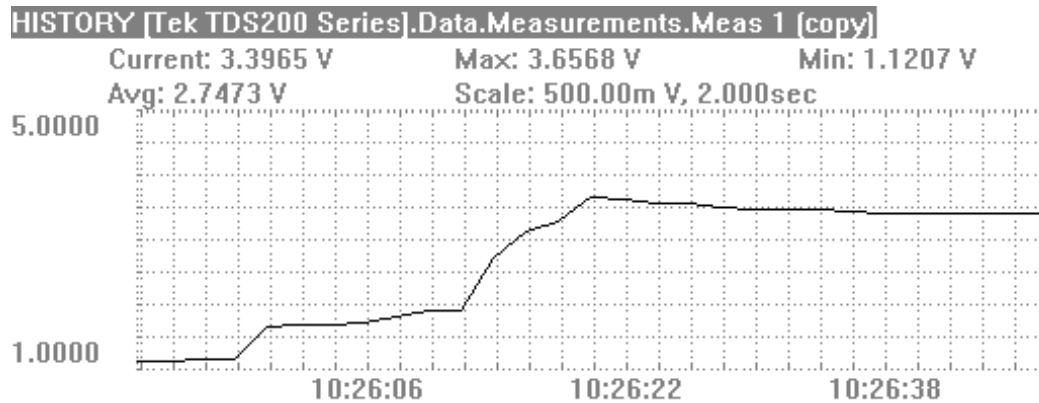


Abbildung 5.11: Ladekurve mit idealer 1,5 V Spannungsquelle

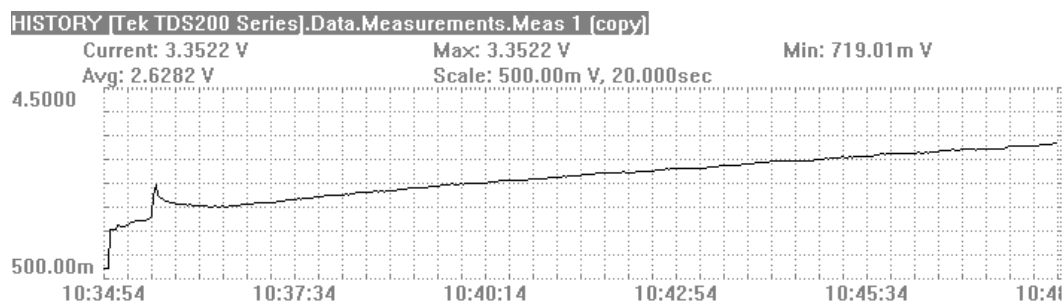


Abbildung 5.12: Der Innenwiderstand der Batterie wirkt sich stark auf die Ladezeit aus

zeigt, dass die Sollausgangsspannung nicht erreicht wird. Die Stromlast, die zum Laden des Speicherkondensators nötig ist, ist offenbar zu groß.

Die Messungen mit den folgenden Schaltungsvarianten werden zeigen, ob es überhaupt möglich ist, bei dieser Heizleistung die Sollausgangsspannung zu erreichen. Wegen dieses Ergebnisses soll die Grundschaltung mit Speicherkondensator zumindest noch mit höherer Heizleistung von $\Phi = 10,8\text{ W}$ untersucht werden. Tatsächlich wird auch mit der Grundschaltung die Spannung von 3,3 V nach ca. 1 Stunde erreicht (Diagramm 5.14).

5.6.3 Ladezeit mit Schottky-Diode

Wie weiter oben beschrieben, kann eine Schottky-Diode zwischen Ein- und Ausgang die Anlaufspannung um ca. 0,2 V verringern. Ob dies Auswirkungen auf die Ladezeit hat, soll nun gezeigt werden. Die Ladekurve ähnelt sehr stark dem Verlauf aus Diagramm 5.13. Man kann also feststellen, dass die Verwendung der Schottky-Diode die Ladezeit kaum beeinflusst. Der Hersteller verspricht im

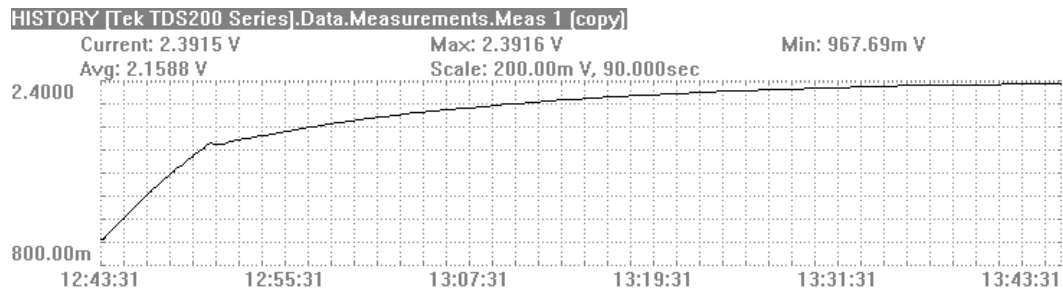


Abbildung 5.13: Laden mit den TEG 100 bei 7,3 W Heizleistung

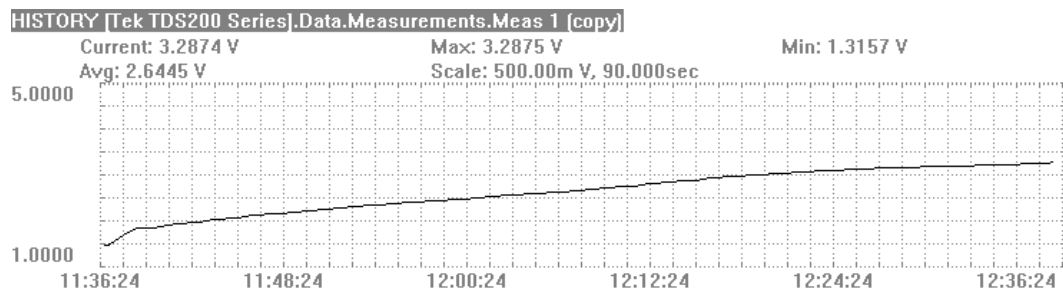


Abbildung 5.14: Laden mit den TEG 100 bei 10,8 W Heizleistung

Datenblatt (siehe Abbildung 5.15), dass der *MAXIM 1676* ohne Last schon ab 0,7 V anläuft. Dieser die Anlaufspannung verringernde Effekt kann experimentell betstätigt werden. Die weiteren Messungen werden daher mit der Schottky-Diode gemacht, da sie die Ladezeit kaum beeinflusst, aber das Anlaufen des *MAXIM 1676* zuverlässiger macht.

Bauteil	Wert / Typ
C1	0,1 μF
C2	47 μF
C3	1 F
L	22 μH
D1	1N5817

Tabelle 5.4: Bauteile der Schaltung mit Schottky-Diode

5.6.4 Erprobung Kaskadenschaltung

In diesem Unterabschnitt wird die Kaskadenschaltung nach Schaltbild 5.8 aufgebaut und getestet. Auch hier prüft man zuerst, ob die Schaltung als Kaskade überhaupt funktioniert. Mit einem Ausgangskondensator der Kapazität 47 μF

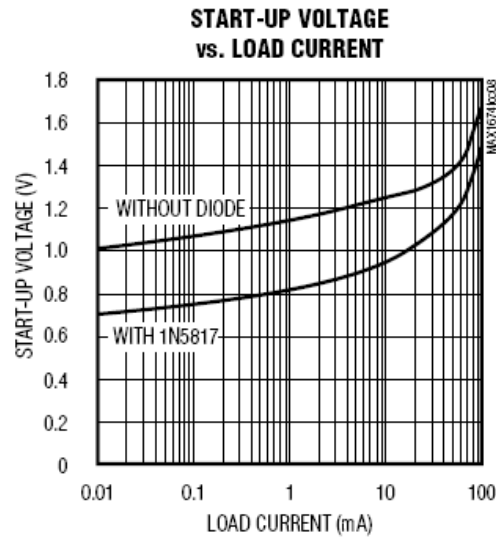


Abbildung 5.15: Anlaufspannung mit und ohne Schottky-Diode (Quelle: Maxim)

wird auch hier ohne weiteres die Sollausgangsspannung erreicht. Eine komplette Liste der verwendeten Bauteile ist in Tabelle 5.5 zu finden.

Bauteil	Wert / Typ
C1	0,1 μF
C2	47 μF
C3	47 μF
C4	0,1 μF
C5	47 μF
L1	22 μH
L2	22 μH
D1	1N5817

Tabelle 5.5: Bauteile der Kaskadenschaltung

Nachdem diese vom Hersteller nicht vorgesehene Schaltung prinzipiell funktioniert hat, werden die Auswirkungen auf die Ladezeiten untersucht. Dazu wird der Kondensator C5 durch den Speicherkondensator ersetzt. Es gilt also $C5 = 1\text{ F}$. Die Ladekurve wird wie üblich aufgenommen. Hier zeigt sich der Nachteil, dass offensichtlich die zweite Stufe der Kaskade eine zu hohe Last darstellt. Weder beim Betrieb der Thermogeneratoren mit 10,8 W noch mit 7,3 W konnten die 3,3 V Ausgangsspannung erreicht werden. Die Spannung blieb deutlich unter dem Sollwert, wie in Abbildung 5.16 zu sehen ist.

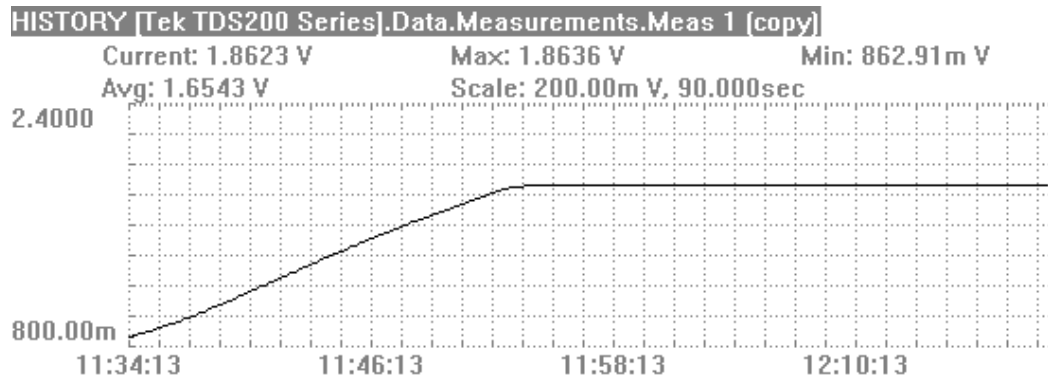


Abbildung 5.16: Laden mit der Kaskadenschaltung bei 10,8 W Heizleistung

Zwar liegt es im Bereich der Erwartungen, dass die Effizienz mit der Kaskadenschaltung sinkt und die Ladezeit dadurch verlängert wird. Die Hoffnung, dass die Ausgangsspannung zuverlässig auch bei geringerer Heizleistung der Thermogeneratoren erreicht wird, muss jedoch aufgegeben werden. Im Gegensatz dazu bringt diese Schaltungsart sogar deutliche Verschlechterungen, sowohl bei niedriger als auch bei höherer Heizleistung.

5.6.5 Testen der Schaltung mit erhöhter Ausgangsspannung und zusätzlicher Diode

Es soll erneut getestet werden, ob ein Erhöhen der Ausgangsspannung die Ladezeit verkürzen kann oder bei ob nun auch bei niedriger Heizleistung die Sollausgangsspannung erreicht wird. Verbesserungen ergaben jedoch beide Maßnahmen nicht. Verdeutlicht man sich nochmals die Arbeitsweise des *MAXIM 1676*, so wird klar, dass das Erhöhen der Ausgangsspannung die Effizienz und Effektivität nicht verbessern kann. Die Steuerlogik bringt den *MAXIM 1676* dazu, so schnell wie möglich die Sollspannung zu erreichen. Wenn diese nicht erreicht ist, so arbeitet der DC-DC Konverter in gleicher Weise. Deshalb ergeben sich auch keine Unterschiede, wenn die Sollspannung erhöht wird.

Das Hinzufügen einer Diode vor den Ausgangskondensator wie in Schaltbild 5.7 beschrieben, bringt ebenfalls keine Vorteile. Wie zu erwarten verringert der Spannungsabfall über der Diode die Spannung des Speicherkondensators. Das Laden geht nicht schneller. Offensichtlich verhindert der *MAXIM 1676* den Ladungsrückfluss vom Ausgangskondensator zum Eingang schon ohne Einwand.

5.6.6 Begrenzen des Ausgangsstromes

Die Begrenzung des Ausgangsstromes kann wie oben beschrieben durch den CL-SET Pin am *MAXIM 1676* geschehen. Der Pin wird auf Masse gelegt. Der Ausgangsstrom ist damit auf 0,5 A begrenzt. Durch die Begrenzung ist die Strombelastung des *MAXIM 1676* nicht so hoch, was das Erreichen der Sollausgangsspannung auch bei niedriger Heizleistung ($\Phi = 7,3 \text{ W}$) ermöglichen könnte. Wie der Verlauf aus Bild 5.17 zeigt, hat sich dies nicht bestätigen lassen. Im Vergleich mit Abbildung 5.13, bei der die Strombegrenzung auf 1 A gesetzt war, fallen weder beim Endwert der Ausgangsspannung noch bei der Ladezeit wesentliche Unterschiede auf.

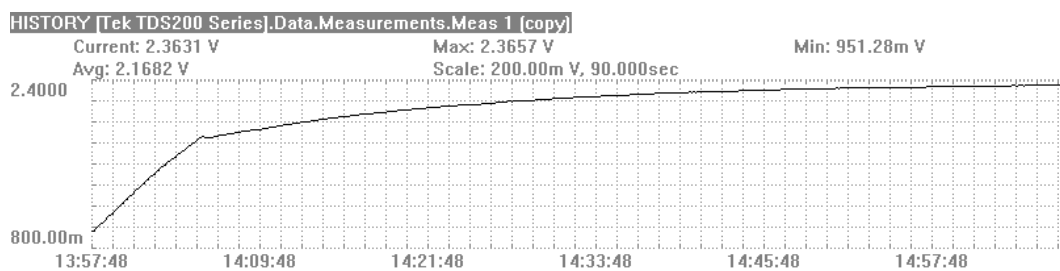


Abbildung 5.17: Laden mit begrenztem Ausgangsstrom (0,5 A)

5.6.7 Ändern von Bauteilwerten

Da die bisherigen Änderungen an der Grundsaltung die Ladezeit nicht verkürzt haben und weil bei niedriger Heizleistung bisher die Sollausgangsspannung nicht erreicht wird, werden in diesem Unterabschnitt die Auswirkungen einer Variation der Bauteile Eingangskondensator C2 und Spule L untersucht und beschrieben. Ein größerer Kondensator am Eingang könnte mit der hohen Stromlast besser zurechtkommen. Es kann erwartet werden, dass außerdem die Spule, die schließlich der Energiespeicher des Step-Up Konverters ist, maßgeblich das Verhalten der Schaltung beeinflusst.

Vergrößern des Kondensators am Eingang

In der Schaltung nach 5.6 wird der Kondensator C2 auf den Wert von $470 \mu\text{F}$ vergrößert und die Messung in der gewohnten Weise durchgeführt. Im Spannungsverlauf sind jedoch keine wesentlichen Verbesserungen im Vergleich zur Grundsaltung festzustellen, weshalb der Verlauf wegen seiner Ähnlichkeit hier nicht aufgeführt werden soll.

Vergrößern der Induktivität

Wie schon erwähnt, wird die Induktivität als Energiespeicher beim Anheben der Spannung verwendet. Die Benutzung einer höheren Induktivität lässt deshalb maßgeblichen Einfluss erwarten. Der Schaltung liegt Abbildung 5.6 zugrunde. Die Bauteile sind in Tabelle 5.6 nochmals aufgelistet.

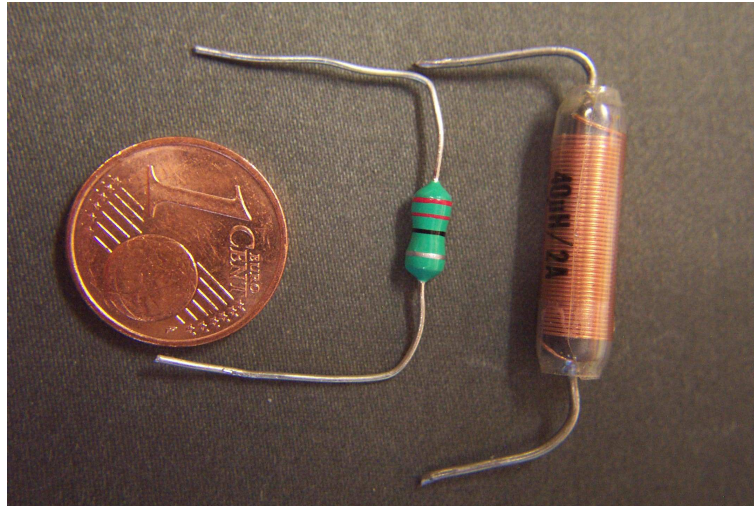


Abbildung 5.18: Bauteilgröße zweier Induktivitäten mit $22\,\mu\text{H}$ und $40\,\mu\text{H}$

Bauteil	Wert / Typ
C1	$0,1\,\mu\text{F}$
C2	$47\,\mu\text{F}$
C3	$1\,\text{F}$
L	$40\,\mu\text{H}$, $0,7\,\Omega$
D1	1N5817

Tabelle 5.6: Bauteilliste mit vergrößerter Induktivität

Zum einen soll hier geprüft werden, ob die Ladezeit verkleinert werden kann. Zweitens wird untersucht, ob auch mit geringerer Heizleistung die Sollausgangsspannung von $3,3\text{V}$ erreicht werden kann. Im Diagramm 5.19 ist deutlich zu erkennen, dass die Ladezeit bei $\Phi = 10,8\text{W}$ auf unter eine Stunde gesunken ist. Dabei handelt es sich um eine recht deutliche Verbesserung, obwohl die Heizleistung und sonstiges nicht geändert worden sind. Offenbar ist die Induktivität mit $22\,\mu\text{H}$ zu klein, um die Stromlast zu bewältigen.

Um besser zu verstehen, wieso es durch ein anderes Bauteil zu derartigen Verbesserungen kommen kann, werden das Signal am LX-Eingang des *MAXIM 1676*

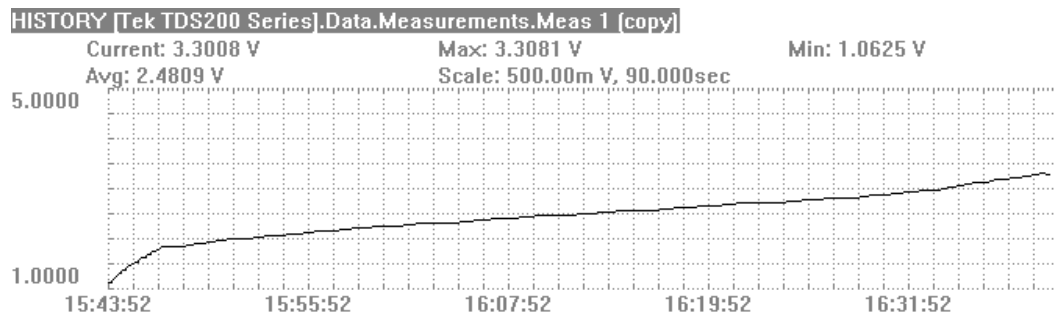
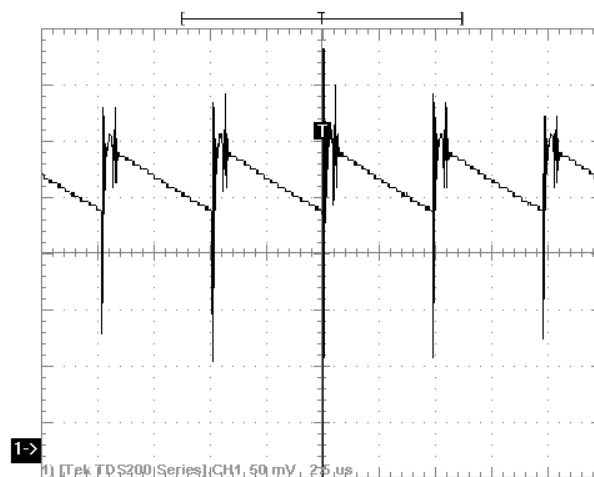


Abbildung 5.19: Ladezeit mit größerer Induktivität

und am Eingang der Schaltung, also vor der Induktivität, mit dem digitalen Oszilloskop aufgenommen. Dabei sollen beide Signale der $22\,\mu\text{H}$ - und der $40\,\mu\text{H}$ -Induktivität miteinander verglichen werden. In Abbildung 5.20 erkennt man, dass die Spannung über dem Eingang der Schaltung annähernd linear schnell steigt und langsamer wieder abfällt. Während des Anstiegs befindet sich der Step-Up Konverter in dem in Schaltbild 5.2 gezeigten Zustand. In dieser Phase erholt sich die Spannung des Eingangskondensators und steigt wieder an. Fällt die Spannung über dem Eingang ab, so befindet sich der Step-Up Konverter in dem Zustand, der in Bild 5.3 dargestellt ist. Die Eingangsspannung sinkt, der Spulenstrom steigt an. Wenn der Spulenstrom einen bestimmten Wert überschreitet, schaltet die Steuerlogik des *MAXIM 1676* auf den anderen Zustand um.

Abbildung 5.20: Spannungsverlauf am Schaltungseingang bei $L = 22\,\mu\text{H}$

Interessant ist nun der Vergleich der Spannungssignale am LX Eingang des *MAXIM 1676* mit den beiden verschiedenen Induktivitäten. In der Ladephase der Induktivität ist die Spannung am LX Pin ungefähr 0 V; der Strom durch die Induktivität steigt, während die Spannung des Eingangskondensators wie in Ver-

lauf nach Diagramm 5.20 sinkt. In der Entladephase ist nach Gleichung 5.3 die Spannung u_L negativ. Nach Maschengleichung 5.1 ist die Spannung am LX-Pin dann:

$$u_{LX} = u_{Ein} - \frac{-u_L}{L} \quad (5.4)$$

In den Abbildungen 5.21 und 5.22 sind beide Zustände des *MAXIM 1676* wiederzuerkennen. Man sieht, dass in der Entladephase eine Spannung von über 3 V am LX-Eingang anliegt. Der Vergleich der Signale mit den verschiedenen Induktivitäten zeigt, dass der Wert der Induktivität von $22 \mu\text{H}$ für die Belastung am Ausgang der Schaltung offensichtlich nicht optimal ist. Nur sehr kurz schnellte die Spannung über 3 V. Somit ist die Entladephase der Induktivität bzw. die Lade- phase des Ausgangskondensators sehr kurz im Vergleich zur Zyklusdauer. Bild 5.22 macht deutlich, dass mit der höheren Induktivität die Spannung am LX Eingang für längere Zeit sogar konstant gehalten werden kann. Hiermit erklärt sich dann auch die verkürzte Ladezeit. Bei gleicher Signalfrequenz wird mehr Zeit pro Periode für das Aufladen des Ausgangskondensators aufgewendet.

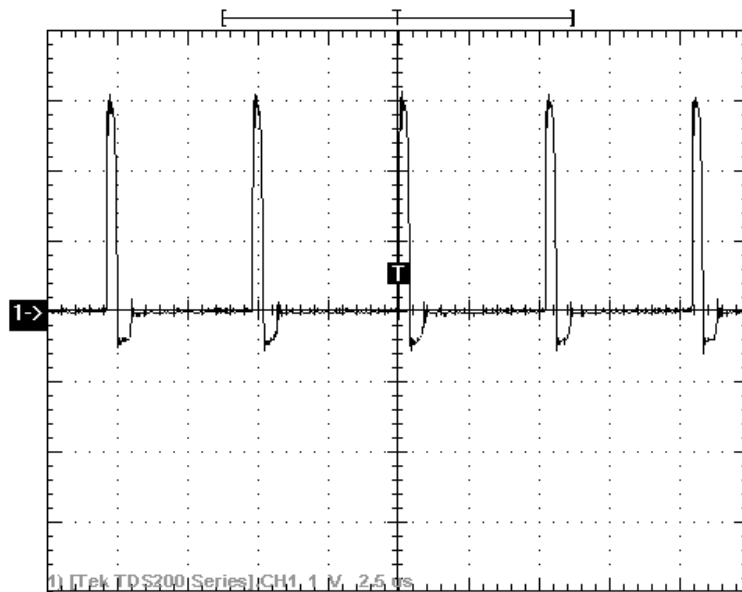


Abbildung 5.21: Spannungsverlauf am Eingang des *MAXIM 1676* bei $L = 22 \mu\text{H}$

Nun zu der interessanten Frage, ob trotz geringerer Heizleistung dennoch die Sollausgangsspannung erreicht werden kann. Ein Blick auf Diagramm 5.23 bestätigt das Austauschen der Induktivität als bisher erfolgreichste Änderung der Originalschaltung. Zwar wird bei der Heizleistung von $\Phi = 7,3 \text{ W}$ nur eine Spannung von $3,08 \text{ V}$ erreicht, aber sie liegt deutlich über dem Niveau vor dem Austausch der Spule, eine deutliche Verbesserung also. Die Spannung liegt damit keine 10% unter

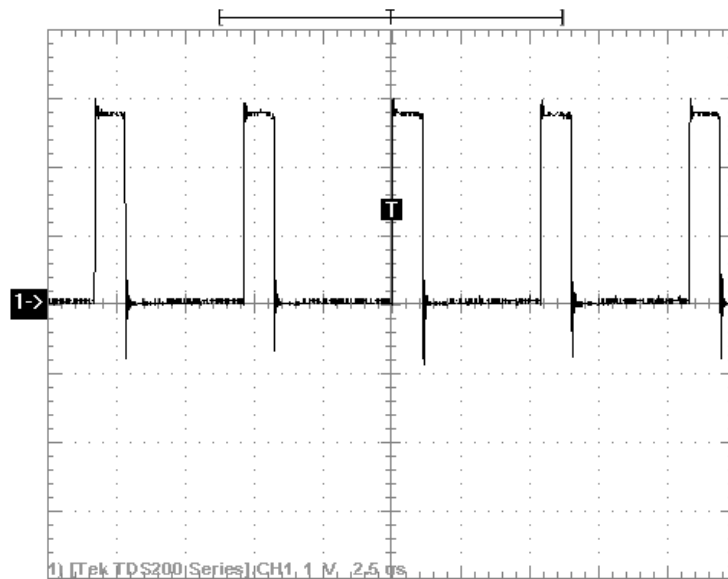


Abbildung 5.22: Spannungsverlauf am Eingang des *MAXIM 1676* bei $L = 40 \mu\text{H}$

dem Sollwert und sollte deshalb trotzdem den Betrieb des als Beispiel gewählten *MICA*-Knotens ermöglichen.

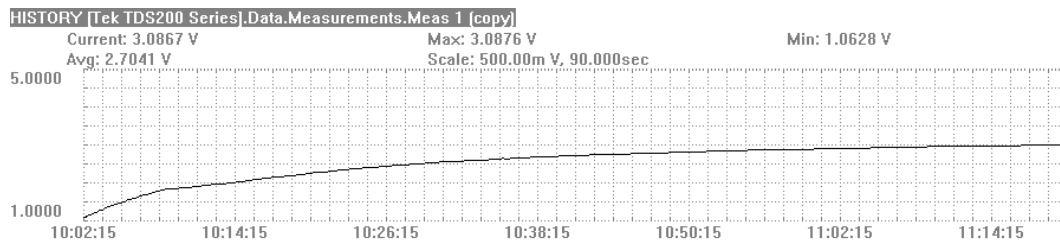


Abbildung 5.23: Ladekurve mit vergrößerter Induktivität und 7,3 W Heizleistung

Damit wäre das Verhalten der verschiedenen Schaltungsvarianten hinreichend geklärt. Abschließend sollen in Tabellenform zur besseren Übersicht die Ladezeiten und die Endwerte der Ausgangsspannungen zusammengefasst werden. Es hat sich gezeigt, dass die Grundschialtung bereits gut funktioniert. Vor allem die Größe der Induktivität beeinflusst die Effizienz der Ladeschialtung enorm, und es empfiehlt sich, den in der Grundschialtung angegebenen Induktivitätswert durch einen größeren zu ersetzen.

5.6.8 Betriebszeit eines MICA-Netzwerkknoten

Der vollständig geladene Energiespeicher betreibt nun einen *MICA*-Knoten. Die *MICA*-Knoten haben bei 2,7 V bis 3,3 V laut *Crossbow* folgenden Leistungsbedarf:

Tätigkeit	Strombedarf	Leistungsbedarf
Senden bei voller Reichweite	25 mA	75 mW
Empfangen	8 mA	24 mW
Sleep-Modus	< 1 μ A	< 3 μ W

Tabelle 5.7: Strom- und Leistungsbedarf des *MICA*-Knotens

Leider war es wegen Hardware-Problemen nicht möglich, die Sendeleistung des *MICA*-Knotens herunterzufahren. Prinzipiell besitzt der Knoten nämlich diese Fähigkeit. Die Sendereichweite bei maximaler Leistung beträgt bis zu 150 m. Für das *Assisted Training* Szenario genügen allerdings Reichweiten von unter 1 m. Deshalb sollte die Laufzeit des *MICA*-Knotens, gespeist von dem geladenen Speicherkondensator, sich noch deutlich erhöhen lassen. Getestet wurde die Laufzeit mit einem Netzwerk von mehreren Knoten. Dabei sendet, verarbeitet und empfängt ein Knoten alle 10 s Daten. Der Netzwerkverkehr ist dabei abhängig von der Anzahl der Knoten. Die Betriebszeiten sind in Tabelle 5.8 zu finden. Der *MICA*-Knoten sendet und empfängt, bis die Versorgungsspannung von 3,3 V unter ca. 2,0 V fällt. Die abgegebene Energiemenge lässt sich berechnen:

$$W = \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ F} \cdot (3,3 \text{ V})^2 - \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ F} \cdot (2 \text{ V})^2 = 3,45 \text{ J} \quad (5.5)$$

$$T_{\text{Betrieb}} = \frac{W}{P} = \frac{3,45 \text{ J}}{0,075 \text{ W}} = 46 \text{ s} \quad (5.6)$$

Dies ist theoretisch die reine Sendezeit. Die praktischen Werte werden mit einem bestehenden Netzwerk aus dem Szenario *Assisted Training* ermittelt. Eine Anpassung der Sendeleistung an die notwendige Reichweite würde die Betriebszeit vermutlich deutlich verlängern, ist aber leider noch nicht implementiert.

Netzwerk / Tätigkeit	Betriebszeit
Rechenoperationen	2:14 min
Rechenop., alle 10s Senden & Empfangen 2 Teilnehmer	1:52 min
Rechenop., alle 10s Senden & Empfangen 4 Teilnehmer	1:33 min

Tabelle 5.8: Betriebszeiten des *MICA*-Knotens

Übersicht der Ladezeiten verschiedener Schaltungen				
Ergebnisse mit $L = 22 \mu\text{H}$				
Nr	Schaltungstyp	Quelle	Ladezeit	Endwert (V)
1	Grundschtaltung	Labornetzteil 1,5 V	28 sec	3,39 V
2	Grundschtaltung	Alkalinebatterie 1,5 V	13:20 min	3,35 V
3	Schaltung mit Schottky-Diode	TEG 7,3 W	63 min	2,39 V
4	Schaltung mit Schottky-Diode	TEG 10,8 W	61 min	3,29 V
5	Schaltung mit SD, 5V Ausgangssollspan- nung	TEG 10,8 W	61 min	3,29 V
6	Schaltung mit Schottky-Diode vor Speicherkondensator	TEG 7,3 W	16 min	1,89 V
7	Schaltung mit Schottky-Diode, 0,5 A Stromlimit	TEG 7,3 W	66 min	2,37 V
8	Schaltung mit Schottky-Diode, Eingangskondensator 470 μF	TEG 10,8 W	68:30 min	3,31 V
9	Kaskadenschaltung	TEG 7,3 W	19:30 min	1,87 V
10	Kaskadenschaltung	TEG 10,8 W	33 min	2,00 V
Ergebnisse mit $L = 40 \mu\text{H}$				
Nr	Schaltungstyp	Quelle	Ladezeit	Endwert (V)
11	Schaltung mit Schottky-Diode	TEG 7,3 W	73:30 min	3,09 V
12	Schaltung mit Schottky-Diode	TEG 10,8 W	55:30 min	3,30 V

Tabelle 5.9: Zusammenfassung Ladezeiten

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird die Energiegewinnung mit thermoelektrischen Generatoren im Hinblick auf *AmI*-Systeme untersucht. Die ausgeführten Messungen zeigen, dass auch mit niedrigen Temperaturdifferenzen, wie sie zwischen dem menschlichen Körper und seiner Umgebung bei Zimmertemperatur auftreten, elektrische Energie erzeugt werden kann. Mit der entwickelten Schaltung gelingt es auf einfache Weise, diese gewonnene Energie in einem Kondensator mit hoher Kapazität zu speichern. Die Schaltung arbeitet mit einem DC-DC Konverter von *MAXIM*, der die Spannung auf das für den Betrieb eines *MICA*-Knoten erforderliche Niveau bringt. Dabei sind die Ladezeiten des Kondensators bei Verwendung verschiedener Schaltungstypen gemessen, die günstigste Variante ermittelt, dann der Betrieb des *MICA*-Knotens aufgenommen und die Messung der Betriebsdauer mit vollem Energiespeicher durchgeführt worden.

Es wird also aufgezeigt, dass Körperwärme die Energiegewinnung für *AmI*-Systeme ermöglicht. Mit Blick auf das Szenario *Assisted Training* muss nun erforscht werden, in welche Kleidungsstücke Thermogeneratoren am besten eingebaut werden, um eine gute Energieausbeute zu erreichen. Als mögliche Kandidaten dürften dabei Schuhe, Mützen, Hemden und Hosen gelten, weil an den Körperstellen, an denen diese Kleidungsstücke getragen werden, hohe Abwärmeströme zu erwarten sind. Aber nicht nur Kleidungsstücke eignen sich für den Einbau. Im *Assisted Training* eingesetzte Pulssensoren, die mit einem Gurt eng an der Brust getragen werden, könnten zukünftig aus Körperwärme die nötige Energie für ihren Betrieb beziehen. Auch Anwendungen außerhalb der *Ambient Intelligence* sind denkbar: Gute Aussichten bestehen beim Einsatz von Thermogeneratoren im Bereich der Sensortechnik, wenn höhere Temperaturdifferenzen (20 K - 100 K) vorhanden sind. Versorgungsunabhängige Sensoren könnten in Heizungssystemen oder Verbrennungsmotoren genutzt werden und sich mit thermoelektrischer Energie betreiben lassen.

Nach diesem Ausblick darf noch ein weiterer Anreiz zur Motivation des Forschers hinzugefügt werden: Da zusammenfassend alle anfangs vorgestellten Verfahren zur Energieumwandlung genügend Potential besitzen, um die unabhängige Energieversorgung mobiler Kleingeräte zu bewerkstelligen, lohnt es sich, weiterhin alle Entwicklungen und Forschungen in diesen Bereichen genau zu beobachten. Eine Kombination von mehreren Methoden könnte in Zukunft die Lei-

stung derartiger „menschlicher“ Energieversorgungen deutlich verbessern. Die Verfahren funktionieren gleichzeitig oder ergänzen sich, wenn in unterschiedlichen Alltagssituationen etwa das eine versagt, aber das andere noch arbeiten kann. Zum Schluss sollte eines nicht vergessen werden: Noch ist die Konkurrenz der „Wegwerf-Batterie“ und des Akkumulators, der am Stromnetz aufgeladen wird, sehr groß. Um den Wunsch nach unabhängiger Versorgung zu erfüllen, muss noch einiges an Forschungsarbeit geleistet werden.

Literaturverzeichnis

- [Bar93] BARTSCH, Marion: Auslegung und technische Entwicklung thermoelektrischer Generatoren aus Bismut für hohe Betriebstemperaturen. (1993). – Abschlussbericht BMFT-Projekt 0328845 A
- [Dew04] DEWALD, Ulrich: Supercap statt Akku - Neue Hochleistungs-Energiepuffer machen Brennstoffzellenautos wirtschaftlicher [online]. 2004 [zitiert 6.10.2004]. Verfügbar auf: <http://www.initiative-brennstoffzelle.de>
- [Hal02] HALUSCHAK, Bernhard: Aktuelle und zukünftige Akkutechnologien [online]. 2002 [zitiert 26.8.2004]. Verfügbar auf: <http://www.tecchannel.de/hardware/1191/index.html>
- [HR96] HALACZEK, Thaddäus L. ; RADEKE, Hans D.: *Batterien und Ladekonzepte*. Franzis-Verlag GmbH, Feldkirchen, 1996
- [Ken98] KENDALL, Clyde J.: *Parasitic Power Collection in Shoe Mounted Devices*, Massachusetts Institute of Technology, Bachelor Thesis, Mai 1998
- [Köt96] KÖTHE, Hans K.: *Stromversorgung mit Solarzellen*. 5. Auflage. Franzis Verlag GmbH, Feldkirchen, 1996
- [Max00] DC-DC Converter Tutorial [online]. 2000 [zitiert 27.12.2004]. Verfügbar auf: http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/710
- [NT98] NELLES, D. ; TUTTAS, C.: *Elektrische Energietechnik*. B.G. Teubner Stuttgart, 1998
- [Par98] PARADISO, Joe: Parasitic Power Harvesting at the MIT Media Lab [online]. 1998 [zitiert 7.10.2004]. Verfügbar auf: <http://www.darpa.mil/dso/trans/energy/briefings/12mit1.pdf>
- [She99] SHENCK, Nathan: *A Demonstration of Useful Electric Power Electring Energy Generation from Piezoceramics in a Shoe*, Massachusetts Institute of Technology, Mastersthesis, Mai 1999

-
- [TR98a] TRUEB, Lucien ; RÜETSCHI, Paul: *Batterien und Akkumulatoren - Mobile Energiequellen für heute und morgen*. Springer, 1998
- [TR98b] TRUEB, Lucien ; RÜETSCHI, Paul: Sekundärbatterien. In: *Batterien und Akkumulatoren - Mobile Energiequellen für heute und morgen*. Springer, 1998, Kapitel 9-14, S. 75–123
- [Wes03] WESTER, Jörg: Kraftquellen - Lithium-Ionen-Akkus entmystifiziert. In: *Heise Zeitschriften Verlag - c't magazin* 17 (2003), S. 170–175

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Litz
Technische Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Postfach 3049
67653 Kaiserslautern
Tel.: +49 (0) 631/205-4450
Fax.: +49 (0) 631/205-4462
E-Mail: litz@eit.uni-kl.de
URL: <http://www.eit.uni-kl.de/litz/>

Dipl.-Ing. Oliver Gabel
Adresse wie oben
Tel.: +49 (0) 631/205-4459
Fax.: +49 (0) 631/205-4462
E-Mail: gabel@eit.uni-kl.de
URL: <http://www.eit.uni-kl.de/litz/>